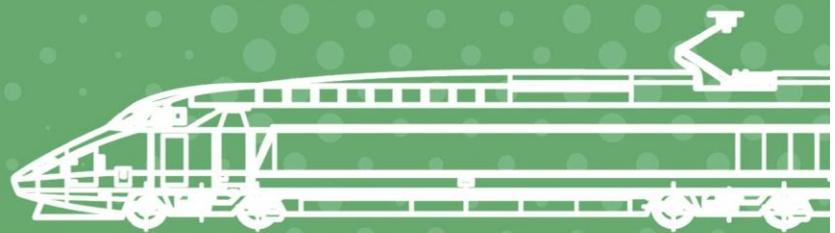


ISSN 2415-8658



**ТРАНСПОРТ
АЗИАТСКО-ТИХООКЕАНСКОГО
РЕГИОНА**

**PACIFIC RIM COUNTRIES
TRANSPORTATION SYSTEM**



№ 2(43) 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

№ 2(43) 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 (ПОМГГФ 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
Стоянович 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
Чжин 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.dvguaps.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 21.07.2025. Дата выхода в свет 23.07.2025.
Заказ 137. Усл. печ. л. 12,0. 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

№ 2(43) 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, «Transcointainer» 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 (Tech-
nical 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 21.07.2025. Publication date 23.07.2025.
Order 137. P. 12,0. Circulation 500 copies
(1st plant 1–40 copies). Free price.

СОДЕРЖАНИЕ

.....	
Алексеев Ю.Г., Афанасенко А.А., Яцевич П.П., Лю Тингоу, Ли Чжунюй ОЦЕНКА ЭМИССИИ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ДОРОЖНОГО БИТУМА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КЛЮЧЕВЫХ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА.....	5
Богданов А.И., Нестерова Н.С., Тесленко И.М. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА.....	16
Гришкова Д.Ю., Молодин Д.М. АНАЛИЗ ПРИЧИН ПРОСТОЯ ВАГОНОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЯХ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ.....	23
Жданова С.М., Нератова О.А., Парамонова И.Е.	31
ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО СЕВЕРА.....	31
Исса Хайдер Абдулсахиб Исса, Велькин В.И., Абдали Лаит Мохаммед Абдали, Кувшинов В.В., Муровский С.П. АВТОНОМНАЯ ГИБРИДНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	36
Ковалев А.А., Основин Д.И., Микава А.В. ВЫБОР ЧИСЛА СКРЫТЫХ НЕЙРОНОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ В СЕТЯХ НЕТЯГОВЫХ И РАЙОННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ	47
Максимовских А.В., Хисанова С.А., Кулинич А.А. ПОВЫШЕНИЕ ПАССАЖИРОПОТОКА ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА НА БАЗЕ РЕФЕРАЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	55
Павликов А.Б., Каменчуков А.В. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЯЗКОГО И РАЗЖИЖЕННОГО БИТУМА ПРИ УКРЕПЛЕНИИ ГРУНТОВ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ	60
Пугачев И.Н., Казарбин А.В. ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА. УПОРЯДОЧИВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЯХ	65
Рамазанова Э.А., Игнатенко И.В., Власенко С.А. ПЕРСПЕКТИВНОЕ РАЗВИТИЕ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ РЕГИОНОВ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА	71
Тряпицын Ю.В., Мельников В.О., Тряпкин Д.А. О ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ОЦЕНКЕ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ БАЛОЧНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ.....	78
Эсаулов В.А. МОДЕЛЬ ВОЗВРАТА ПОЕЗДОПОТОКА С ПРИПОРТОВЫХ И ПОГРАНИЧНЫХ СТАНЦИЙ ВОСТОЧНОГО ПОЛИГОНА В УСЛОВИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ МАКСИМАЛЬНОЙ ВЫГРУЗКИ	89
Яковлева А.Т. ДОРОЖНЫЙ СЮРВЕЙ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ НЕГАБАРИТНЫХ ГРУЗОВ	94
К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ	103

CONTENTS

.....

Aliakseyeu Y.G., Afanasenka A.A., Yatsevich P.P., Liu Tingguo, Li Zhongyu QUANTIFICATION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUND EMISSIONS FROM ASPHALT BINDER UNDER SIMULATED PRODUCTION AND IN-SERVICE CONDITIONS	5
Bogdanov A.I., Nesterova N.S., Teslenko I.M. CURRENT STATE AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT NETWORK OF THE FAR EASTERN FEDERAL DISTRICT	16
Grishkova D.Y., Molodin D.M. ANALYSIS OF THE REASONS FOR CARS' DOWNTIME ON NON-PUBLIC RAILWAY TRACKS.....	23
Zhdanova S.M., Neratova O.A., Paramonova I.E. PROBLEMS OF ROADBED OPERATION ON PERMAFROST SOILS IN THE FAR EASTERN NORTH.....	31
Issa Hayder A., Velkin V.I., Abdali Layth M., Kuvshinov V.V., Murovsky S.P. AUTONOMOUS HYBRID ENERGY SYSTEM BASED ON SOLAR CONVERTERS AND HYDROGEN FUEL CELLS	36
Kovalev A.A., Osnovin D.I., Mikava A.V. SELECTING THE NUMBER OF HIDDEN NEURONS FOR DETECTING EMERGENCY MODES IN NON-TRACtion AND DISTRICT CONSUMER NETWORKS.....	47
Maksimovskih A.V., Hisanova S.A., Kulinich A.A. INCREASING THE PASSENGER TRAFFIC OF THE CITY TRAIN BASED ON THE REFERRAL PROGRAM.....	55
Pavlikov A.B., Kamenchukov A.V. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE USE OF VISCOUS AND LIQUEFIED BITUMEN IN STRENGTHENING ROAD SURFACE SOILS	60
Pugachev I.N., Kazarbin A.V. PRIORITY DIRECTIONS OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT COMPLEX. STRENGTHENING THE PROCESSES OF TRANSPORT PLANNING IN URBAN AGGLOMERATIONS	65
Ramazanova E.A., Ignatenko I.V., Vlasenko S.A. PROSPECTIVE DEVELOPMENT OF POWER SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF THE FAR EASTERN FEDERAL DISTRICT REGIONS	71
Tryapitsin Y.V., Melnikov V.O., Tryapkin D.A. ON THE ERROR OF THE TRANSVERSE INSTALLATION COEFFICIENT METHOD IN ASSESSING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF BEAM SPAN STRUCTURES OF HIGHWAY BRIDGES	78
Esaulov V.A. MODEL OF TRAIN FLOW RETURN FROM PORT AND BORDER STATIONS OF THE EASTERN POLYGON UNDER CONDITIONS OF MAXIMUM UNLOADING	89
Yakovleva A.T. ROAD SURVEY FOR THE ORGANIZATION OF TRANSPORTATION OF OVERSIZED GOODS	94
AUTHORS GUIDELINES.....	104

Научная статья
УДК 665.775
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-5-15

ОЦЕНКА ЭМИССИИ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ДОРОЖНОГО БИТУМА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КЛЮЧЕВЫХ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Алексеев Юрий Геннадьевич¹, Афанасенко Алексей Александрович²,
Яцевич Павел Петрович³, Лю Тингоу⁴, Ли Чжуньюй⁵

^{1,5} Хэнаньская ключевая лаборатория высококачественных технологий диагностики и обслуживания автомагистралей, Синьсян, провинция Хэнань, Китайская Народная Республика

^{2,3} Белорусский национальный технический университет, филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», Центр научных исследований и испытаний дорожно-строительных и гидроизоляционных материалов, Минск, Республика Беларусь

⁴ Компания «Гаююань», Хэнаньская компания по технологиям обслуживания автомобильных дорог, Синьсян, провинция Хэнань, Китайская Народная Республика

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

Аннотация. Дорожный битум, являясь основным вяжущим в асфальтобетонных смесях, служит источником эмиссии летучих органических соединений (ЛОС), представляющих эколого-токсикологическую опасность. Цель настоящей работы – количественная оценка и сравнительный анализ компонентного состава и интенсивности эмиссии ЛОС из дорожного битума марки 70/100 по СТБ EN 12591, моделирующих технологическую (нагрев до 160 °С с остыванием до 100 °С) и эксплуатационную (длительная выдержка при 60 °С) стадии жизненного цикла. Идентификация и количественный анализ парогазовой фазы выполнялись методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ–МС).

Установлено, что эмиссионный профиль динамически изменяется на всех этапах. В эксплуатационном режиме длительная выдержка при 60 °С приводит к росту суммарной концентрации летучих органических соединений (Total Volatile Organic Compounds, TVOC) за счет термоокислительной деструкции с образованием преимущественно ацетона и метанола. В технологическом режиме зафиксирован наиболее значимый с практической точки зрения результат – максимальная эмиссия, в том числе пятикратный рост концентрации канцерогенного бензола наблюдается не при пиковой температуре 160 °С, а в процессе последующего трехчасового остывания до 100 °С.

Для корректной оценки опасности впервые применен расчетный Индекс токсикологической опасности (ИТО), учитывающий предельно допустимые концентрации (ПДК) компонентов. Доказано, что оценка риска на основе показателя TVOC является некорректной. Расчет ИТО показал, что оба режима представляют значительную опасность (ИТО > 1), однако, в технологическом режиме формируется более сложный состав токсикантов, включая канцерогенный бензол. Полученные данные являются прямым научным обоснованием для минимизации температурного воздействия и подтверждают необходимость приоритетного внедрения низкотемпературных асфальтобетонных технологий.

Ключевые слова: дорожный битум, асфальтобетон, летучие органические соединения (ЛОС), эмиссия, газовая хроматография-масс-спектрометрия (ГХ-МС), жизненный цикл, температурный режим, бензол, оценка риска

Original article

QUANTIFICATION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUND EMISSIONS FROM ASPHALT BINDER UNDER SIMULATED PRODUCTION AND IN-SERVICE CONDITIONS

Aliakseyeu Yury G.¹, Afanasenka Aliaksei A.², Yatsevich Pavel P.³, Liu Tingguo⁴, Li Zhongyu⁵

^{1,5} Henan province key laboratory of high-grade highway detection and maintenance technology, Xinxiang, Henan, People's Republic of China

^{2,3} 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

⁴ Founder & CEO, «Gaoyuan», Henan Gaoyuan Highway Maintenance Technology Co. Ltd, Xinxiang, Henan, People's Republic of China

Corresponding author: Afanasenka Aliaksei Alexandrovich, cniidsgm@bntu.by

QUANTIFICATION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUND EMISSIONS FROM ASPHALT BINDER UNDER SIMULATED PRODUCTION AND IN-SERVICE CONDITIONS

Abstract. Paving bitumen, the primary binder in asphalt mixtures, is a source of Volatile Organic Compound (VOC) emissions, which pose an eco-toxicological hazard. This study is aimed to quantify and comparatively analyze the composition and intensity of VOC emissions from a 70/100 penetration grade paving bitumen, compliant with STB EN 12591, under simulated technological (heating to 160 °C followed by cooling to 100 °C) and in-service (prolonged exposure at 60 °C) life cycle stages. The identification and quantification of the vapor phase were performed using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS).

It was established that the emission profile dynamically changes at all stages. Under the in-service conditions, prolonged exposure at 60°C leads to increase in the total concentration of volatile organic compounds (TVOC) due to thermo-oxidative degradation, which predominantly forms acetone and methanol. For the technological conditions, the most practically significant result was recorded: the maximum emission, including a five-fold increase in the concentration of carcinogenic benzene, was observed not at the peak temperature of 160°C, but during the subsequent three-hour cooling period down to 100 °C.

To correctly assess the hazard, a calculated Toxicological Hazard Index (THI), which considers the permissible exposure limits (PELs) of the components, was applied for the first time. It was proven that the risk assessment based on the TVOC indicator is incorrect. The THI calculation showed that both regimes pose a significant hazard (THI > 1); however, the technological regime forms a more complex composition of toxicants, including carcinogenic benzene. The obtained data provide a direct scientific basis for minimizing thermal exposure and confirm the necessity of prioritizing the implementation of low-temperature asphalt technologies.

Keywords: paving bitumen, asphalt concrete, volatile organic compounds (VOCs), emission, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), life cycle, temperature conditions, benzene, risk assessment

Введение

По данным Международной дорожной федерации (IRF) общая протяженность дорожной сети с асфальтобетонным покрытием превышает 20 млн км, и асфальтобетон остается наиболее широко применяемым материалом для устройства покрытий на дорогах с высокой интенсивностью движения [1]. Высокие транспортно-эксплуатационные характеристики, технологичность производства и ремонтпригодность обусловили его широчайшее применение. Дорожный битум, ключевой связующий компонент асфальтобетона, не является химически инертным материалом и на протяжении всего жизненного цикла служит источником эмиссии летучих органических соединений (ЛОС) [2–6], включая полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) [3, 7–9], а также другие сложные химические элементы [3].

Эмиссия данных веществ представляет значительные эколого-токсикологические риски [3, 10]. Международное агентство по изучению рака (IARC) классифицирует профессиональное воздействие паров битума при дорожно-строительных работах как возможно канцерогенное для человека (группа 2B) [11]. При этом оценка реального воздействия битумных эмиссий на здоровье персонала дорожно-строительной отрасли представляет собой сложную научную задачу, что находит отражение в неоднозначности результатов многих эпидемиологических исследований [3, 10, 12]. Основная трудность заключается в корректном учете множества смешивающих факторов (конфаундеров), которые могут исказить итоговые выводы. К таким факторам относятся, в первую очередь, курение [3, 10, 12–14], являющееся доминирующим риском развития рака легких; контакт с выхлопными газами дизельных двигателей дорожно-строительной техники [3, 10, 14, 15], которые сами по себе классифицированы IARC как канцерогенные (группа 1); ингаляционное воздействие кристаллического диоксида кремния (кремнеземной пыли) от минеральных заполнителей [3]; а также влияние ультрафиолетового излучения [3]. Несмотря на эти

методологические трудности, совокупный анализ данных позволил IARC сформировать текущую классификацию. Важно отметить, что даже при отсутствии однозначных доказательств канцерогенности для человека, отнесение к группе 2B указывает на наличие ограниченных, но заслуживающих внимания доказательств у людей [3, 12, 16–18] и достаточных доказательств в экспериментах на животных [3, 19–21], что требует применения принципа предосторожности и минимизации воздействия.

Наряду с канцерогенными рисками, значительное внимание уделяется нераковым последствиям для здоровья. Многочисленные исследования подтверждают развитие острых и хронических респираторных симптомов у дорожных рабочих, включая кашель, одышку и раздражение дыхательных путей [3, 10, 15, 18]. Объективные измерения функции легких часто показывают снижение таких показателей, как форсированная жизненная емкость легких (FVC) и объем форсированного выдоха за первую секунду (FEV1). На системном уровне у рабочих, подвергающихся воздействию битумных паров, регистрируются повышенные уровни маркеров воспаления, таких как С-реактивный белок, и маркеров окислительного стресса, что свидетельствует о генерализованной реакции организма на ингаляцию токсичных веществ. Также зафиксированы изменения в субпопуляциях лимфоцитов и активация Т- и В-клеток, что указывает на иммуномодулирующее действие компонентов эмиссии и потенциальное снижение иммунной защиты [3, 10].

Для понимания первопричин этих рисков необходимо рассмотреть химическую природу эмиссий. Пары битума представляют собой сложнейшую аэрозольно-паровую смесь, включающую тысячи индивидуальных соединений [7, 16, 22]. Их состав и концентрация зависят от множества факторов, но ключевыми токсикантами, определяющими опасность, являются ПАУ и другие ЛОС [2–9, 22]. В составе паров идентифицированы как относительно летучие двух- и трехкольцевые ПАУ (нафталин, фенантрен), так и тяжелые четырех-, пяти-

и шестикольцевые соединения (бенз[а]антрацен, хризен, бенз[а]пирен), обладающие доказанной высокой канцерогенной активностью [3, 7, 8, 10]. Механизм их действия связан с метаболической активацией в организме. Попадая в печень, молекулы ПАУ подвергаются воздействию ферментной системы цитохрома Р450, превращаясь в высокореакционные диол-эпоксиды. Эти метаболиты способны ковалентно связываться с нуклеиновыми основаниями в молекуле ДНК, образуя ДНК-аддукты. Накопление таких аддуктов нарушает процессы репликации и транскрипции, приводит к генетическим мутациям и в конечном итоге может инициировать процесс злокачественной трансформации клетки [3, 19, 23]. Важно отметить, что стандартный мониторинг по перечню 16 приоритетных ПАУ, установленных Агентством по охране окружающей среды США (EPA), не дает полной картины, поскольку в битумных эмиссиях в значительных концентрациях присутствуют их кислородные, азотные и серные аналоги (гетеро-ПАУ), которые могут обладать даже большей генотоксичностью, чем их углеводородные гомологи [3, 5, 7].

Среди прочих ЛОС особое внимание исследователей привлекают летучие ароматические углеводороды. Бензол, присутствующий в эмиссиях, является доказанным гемотоксином и канцерогеном для человека (IARC, Группа 1). Его токсичность обусловлена метаболизмом в печени и костном мозге до реактивных хинонов и эпоксидов, которые вызывают окислительный стресс и повреждают стволовые клетки крови. Это приводит к подавлению функции костного мозга, развитию анемии, лейкопении и в долгосрочной перспективе к возникновению миелодиспластических синдромов и острого миелоидного лейкоза [24, 25]. Тoluол, в свою очередь, оказывает выраженное нейротоксическое действие, влияя на ГАМК-ергическую и дофаминергическую системы центральной нервной системы. Хроническое воздействие толуола может приводить к нарушениям когнитивных функций, памяти и координации. Кроме того, он обладает фетотоксичностью, приводя к задержкам развития и врожденным аномалиям при воздействии на материнский организм [21]. Другие компоненты, такие как ксилолы и стирол, также вносят вклад в общую токсичность смеси [5].

Интенсивность и качественный состав этих эмиссий не являются статичными, а в решающей степени зависят от внешних факторов, среди которых центральную и неоспоримую роль играет температура [2, 4, 6, 22, 26]. Физико-химическая основа этого явления заключается во влиянии температуры на два ключевых процесса: давление насыщенных паров индивидуальных компонентов и их коэффициент диффузии внутри вязкой битумной матрицы. Зависимость давления паров от температуры описывается уравнением Клаузиуса–Клапей-

рона, из которого следует экспоненциальный рост летучести с повышением температуры. Одновременно, согласно уравнению Аррениуса, возрастает и скорость диффузии молекул ЛОС к поверхности, откуда они могут испариться [4]. Совокупное действие этих двух эффектов приводит к тому, что даже незначительное увеличение температуры вызывает многократный рост интенсивности эмиссии. Экспериментально показано, что при нагреве битума от 160 до 220 °С количество идентифицируемых пиков ЛОС на хроматограммах может увеличиваться в разы [4]. При этом происходит не только количественный рост, но и качественное изменение эмиссионного профиля: при более высоких температурах значительно возрастает доля тяжелых, менее летучих, но более токсичных ПАУ [3, 5, 22].

Помимо температуры, на эмиссию влияют марка и источник происхождения битума [3–5, 7], наличие и тип полимерных модификаторов (так, SBS-модификаторы, формируя в битуме трехмерную полимерную сетку, могут физически «запирать» часть летучих молекул и снижать эмиссию при умеренных температурах, однако, их термическая деградация при перегреве нивелирует этот эффект), а также степень окислительного старения вяжущего [4]. В процессе эксплуатации под действием кислорода и УФ-излучения в битуме протекают реакции окисления с образованием карбонильных и сульфоксидных групп, что приводит к увеличению полярности и вязкости системы и, как следствие, к изменению эмиссионного профиля [3, 5].

Для анализа эмиссии ЛОС из битума в лабораторных условиях применяется широкий спектр мощных аналитических методов. Классические подходы включают термогравиметрический анализ (ТГА) [22], пиролиз и термодесорбцию в сочетании с газовой хроматографией-масс-спектрометрией (ГХ–МС) [4, 8, 22, 23], что позволяет проводить точную идентификацию и количественное определение компонентов. Использование капиллярных колонок различной полярности (например, HP-5ms) позволяет разделять сложнейшие смеси углеводородов [10, 23, 27]. В последние годы для мониторинга в режиме реального времени все чаще используется масс-спектрометрия с протонным переносом (PTR–MS), обладающая высокой чувствительностью и временным разрешением, что позволяет отслеживать динамику эмиссии при изменении условий [5]. Несмотря на наличие столь мощных аналитических инструментов и значительный объем накопленных данных, в научной литературе сохраняется существенный методологический пробел. Подавляющее большинство работ посвящено изучению эмиссии либо в узком диапазоне технологических температур (140–180 °С) [4, 5, 23], либо при моделировании отдельных аспектов эксплуатации [5, 22]. Практически отсутствуют комплексные исследования, направленные на прямое количественное сопостав-

ление полных эмиссионных профилей, полученных в стандартизованных условиях, имитирующих ключевые технологические (высокотемпературные) и эксплуатационные (низкотемпературные) стадии жизненного цикла для одного и того же образца вяжущего. Отсутствие таких сравнительных данных не позволяет объективно оценить относительный вклад различных этапов жизненного цикла в общую токсикологическую нагрузку, затрудняет разработку адекватных моделей оценки риска и снижает научную аргументацию в пользу повсеместного внедрения низкотемпературных технологий.

В связи с изложенной целью настоящей работы является количественная оценка и сравнительный анализ компонентного состава и интенсивности эмиссии летучих органических соединений из дорожного битума при лабораторном моделировании технологических и эксплуатационных температурных режимов.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования был выбран вязкий дорожный битум марки 70/100, физико-механические и реологические свойства которого полностью соответствовали требованиям стандарта СТБ EN 12591 [28]. Выбор данной марки обусловлен ее широким применением в дорожном строительстве на территории Республики Беларусь для устройства верхних слоев покрытий автомобильных дорог различных категорий и улиц населенных пунктов. Для обеспечения неизменности исходного состава и предотвращения преждевременного окислительного старения, которое могло бы исказить эмиссионный профиль, образцы битума до начала проведения экспериментов хранились в лабораторных условиях в герметично закрытой таре при стабильной комнатной температуре (20 ± 2 °C), вдали от прямых солнечных лучей и источников тепла.

Для проведения качественной идентификации и последующего количественного определения компонентов эмиссии использовался метод газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ-МС). Анализ проводили на газовом хроматографе Hewlett-Packard 5890 Series II, оснащенный высокочувствительным квадрупольным масс-спектрометрическим детектором HP 5972. Для разделения сложной многокомпонентной смеси летучих органических соединений применялась стандартная неполярная капиллярная колонка HP-5ms ($30 \text{ м} \times 0,25 \text{ мм} \times 0,25 \text{ мкм}$). В качестве газа-носителя использовали химически инертный гелий высокой чистоты (99,999 %) с постоянным потоком через колонку 1,2 мл/мин.

Пробоподготовка и ввод пробы в хроматограф осуществлялись методом статического равновесного парофазного анализа (headspace). Навеску битума массой $10,00 \pm 0,01$ г помещали в стандартную стеклянную лабораторную колбу. Герметизация

колбы производилась с использованием обжимных алюминиевых крышек с инертной двухслойной септой из ПТФЭ/силикона, что гарантировало полную герметичность системы.

Центральным элементом методологии являлось лабораторное моделирование двух принципиально различных сценариев, отражающих ключевые стадии жизненного цикла дорожного покрытия. Для отслеживания динамики эмиссии в рамках каждого сценария отбор проб производился в нескольких ключевых точках.

Модель 1: разработана для детального изучения изменения эмиссионного профиля при длительном низкотемпературном нагреве, имитирующем прогрев дорожного покрытия в летний период. Эксперимент состоял из трех последовательных этапов с отбором проб в каждой точке: начальный нагрев, в рамках которого производился отбор пробы сразу по достижении образцом температуры 60 °C; длительная выдержка, предполагавшая термостатирование колбы при 60 °C в течение 8 ч с последующим отбором пробы; охлаждение, на котором после прекращения нагрева и полного остывания колбы до комнатной температуры производился заключительный отбор пробы для анализа остаточной эмиссии.

Модель 2: имитировала динамику эмиссии в технологическом режиме, характерном для производства и укладки горячих асфальтобетонных смесей. Данный эксперимент также включал три этапа отбора проб: исходное состояние, где производился отбор пробы из герметичной колбы при комнатной температуре (20 ± 2 °C) для определения фонового состава летучих соединений; пиковый нагрев, на котором отбор пробы осуществлялся сразу по достижении образцом температуры 160 °C; охлаждение, где после нагрева колба остывала в течение 3 ч до 100 °C, и при достижении этой температуры производился заключительный отбор пробы.

Идентификация компонентов эмиссии проводилась путем сопоставления экспериментально полученных масс-спектров с эталонными спектрами из авторитетной библиотеки масс-спектральных данных NIST/Wiley. Для количественного определения концентраций идентифицированных соединений применялся метод абсолютной внешней калибровки по предварительно построенным градуировочным графикам на основе анализа сертифицированных многокомпонентных газовых смесей. Расчет концентраций ЛОС в парогазовой фазе над образцом битума производился по полученным уравнениям регрессии с последующим выражением результатов в стандартных единицах ($\text{мг}/\text{м}^3$).

Результаты исследования

В результате проведенных экспериментальных исследований с использованием метода газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием были получены данные о компонентном составе и концентрации летучих органических

ОЦЕНКА ЭМИССИИ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ДОРОЖНОГО БИТУМА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КЛЮЧЕВЫХ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

соединений, эмитируемых из образца дорожного битума марки 70/100 в режимах, моделирующих эксплуатационные и технологические стадии его жизненного цикла.

При моделировании эксплуатационного режима была выявлена сложная динамика эмиссионного профиля, на которую существенное влияние оказала продолжительность термического воздействия. На начальном этапе, сразу после достижения образцом температуры 60 °С, суммарная концентрация ЛОС (TVOC) была относительно невысока. Однако после длительной восьмичасовой выдержки при данной температуре, в течение которой происходило непрерывное выделение и накопление летучих компонентов в герметичном объеме колбы, наблюдалось кардинальное изменение. Суммарная эмиссия возросла практически на порядок, достигнув пикового значения в данном эксперименте. Этот рост был обусловлен в первую очередь интенсивным выделением ацетона, который стал доминирующим компонентом, а также появлением в парогазовой фазе значительного количества метанола.

На заключительном этапе, после прекращения нагрева и длительного периода остывания образца до комнатной температуры, эмиссионный профиль вновь полностью перестроился. Несмотря на снижение температуры, суммарная концентрация ЛОС оставалась на высоком уровне, в 5 раз превышающем начальный. Это свидетельствует о том, что процесс десорбции и перераспределения компонентов в замкнутой системе продолжался и во время охлаждения. Ключевым изменением на этом этапе стало практически полное исчезновение ацетона и ароматических углеводородов из парогазовой фазы, но при этом был зафиксирован выход значительного количества гексана, который не обнаруживался на стадиях нагрева. Детальные количественные данные по Модели 1, представлены в табл. 1.

При моделировании технологического режима (Модель 2) были получены не менее показательные результаты, демонстрирующие сложную зависимость эмиссии не только от температуры, но и от времени. В исходном состоянии при комнатной температуре эмиссия была минимальной. При пиковом нагреве до 160 °С суммарная концентрация ЛОС резко возрастала, а эмиссионный профиль характеризовался сложным составом с преобладанием спиртов и кетонов.

Наиболее важные изменения были зафиксированы на этапе контролируемого остывания образца. Следует подчеркнуть, что замер производился после трехчасового периода остывания до 100 °С, в течение которого летучие компоненты продолжали выделяться из битумной матрицы и накапливаться в герметично закрытом объеме колбы. В результате этого процесса накопления, вопреки интуитивным ожиданиям, итоговая суммарная

концентрация ЛОС не снизилась, а, наоборот, достигла своего максимального значения за весь эксперимент. При этом произошла качественная перестройка состава: доминирующими компонентами стали этилацетат и гексан. Критически важным является тот факт, что именно в течение этого трехчасового периода остывания концентрация высокотоксичного бензола в парогазовой фазе увеличилась более чем в 5 раз по сравнению с точкой максимального нагрева. Детальные количественные данные по Модели 2 представлены в табл. 2.

Таблица 1

Компонентный состав и концентрация, мг/м³, ЛОС на различных этапах модели 1

Класс соединений	Идентифицированное соединение	Нагрев до 60 °С	Выдержка 8 ч при 60 °С	Охлаждение до 20 °С
Алифатические УВ	Гексан	н/о	н/о	33,60
Ароматические УВ	Бензол	0,32	0,14	н/о
	Толуол	0,28	0,66	н/о
Кетоны	Ацетон	2,94	62,05	н/о
Сложные эфиры	Этилацетат	4,48	4,71	н/о
Спирты	Метанол	н/о	10,64	5,11
Прочие	2-этоксиэтанол	н/о	0,26	н/о
Суммарно (TVOC)		8,02	78,46	38,71

Примечание – н/о – не обнаружено (концентрация ниже предела обнаружения метода).

Таблица 2

Компонентный состав и концентрация, мг/м³, ЛОС на различных этапах Модели 2

Класс соединений	Идентифицированное соединение	Исходное 20 °С	Нагрев до 160 °С	Охлаждение до 100 °С
Алифатические УВ	Гексан	1,72	1,04	20,27
Ароматические УВ	Бензол	н/о	0,29	1,52
Кетоны	Ацетон	н/о	9,13	6,55
Сложные эфиры	Этилацетат	н/о	7,19	23,15
Спирты	Метанол	н/о	14,16	5,31
	Этанол	н/о	5,55	1,39
	2-пропанол	н/о	10,00	н/о
Прочие	2-этоксиэтанол	2,62	0,81	н/о
Суммарно (TVOC)		4,34	48,17	58,19

Примечание – н/о – не обнаружено (концентрация ниже предела обнаружения метода).

QUANTIFICATION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUND EMISSIONS FROM ASPHALT BINDER UNDER SIMULATED PRODUCTION AND IN-SERVICE CONDITIONS

Для наглядной визуализации и качественного анализа сложных динамических процессов, описанных выше, были построены графические зависимости, иллюстрирующие изменение компонентного состава эмиссии на каждом этапе эксперимента.

На рис. 1 представлены диаграммы, наглядно демонстрирующие качественную перестройку эмиссионных профилей в обеих моделях. График для Модели 1 (рис. 1, а) визуально подтверждает не только многократный рост суммарной эмиссии на этапе выдержки, но и абсолютное доминирование одного компонента, в частности ацетона, с последующей его полной заменой на гексан на стадии остывания. Диаграмма для Модели 2 (рис. 1, б) иллюстрирует еще более сложную картину, показывающую, что максимальная суммарная эмиссия дости-

гается не в точке пикового нагрева, а в процессе последующего трехчасового остывания, и отчетливо демонстрирует смену доминирующих компонентов, от спиртов при 160 °С к сложным эфирам и алифатическим углеводородам при 100 °С.

С учетом особой токсикологической значимости бензола как доказанного канцерогена для человека (IARC, группа 1), его динамика в Модели 2 была вынесена на отдельный график (рис. 2). Данная визуализация с высокой степенью наглядности демонстрирует ключевой результат исследования, а именно нелинейный рост концентрации бензола на стадии остывания. Этот показатель многократно превышает значения, зафиксированные при максимальной температуре, и пересекает условный порог опасности.

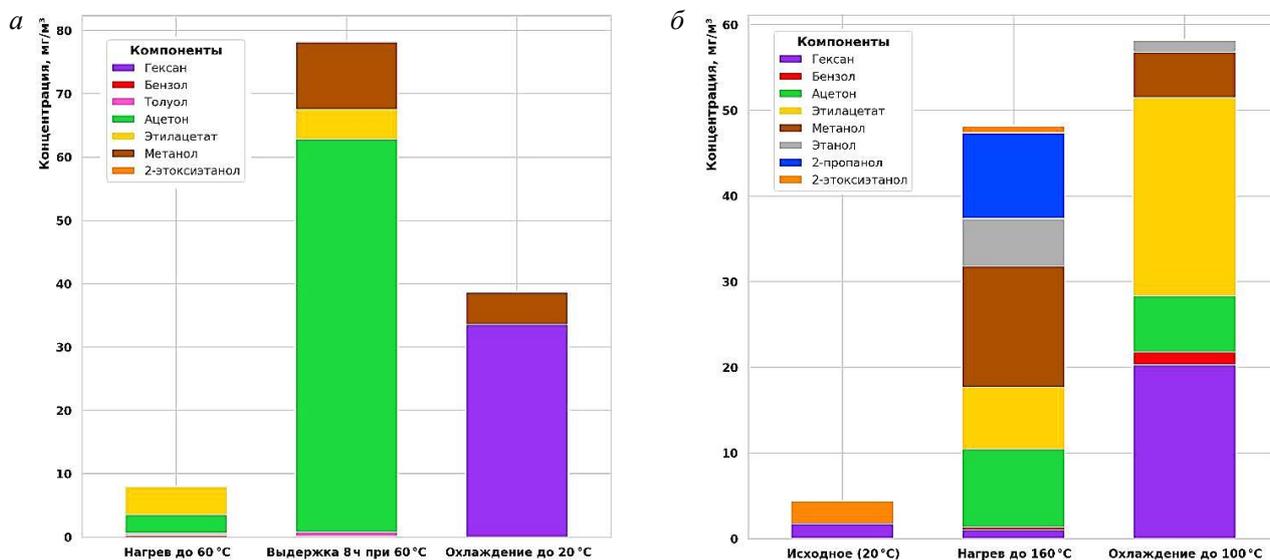


Рис. 1. Динамика компонентного состава эмиссии ЛЮС:
а – Модель 1 (эксплуатационный режим); б – Модель 2 (технологический режим)

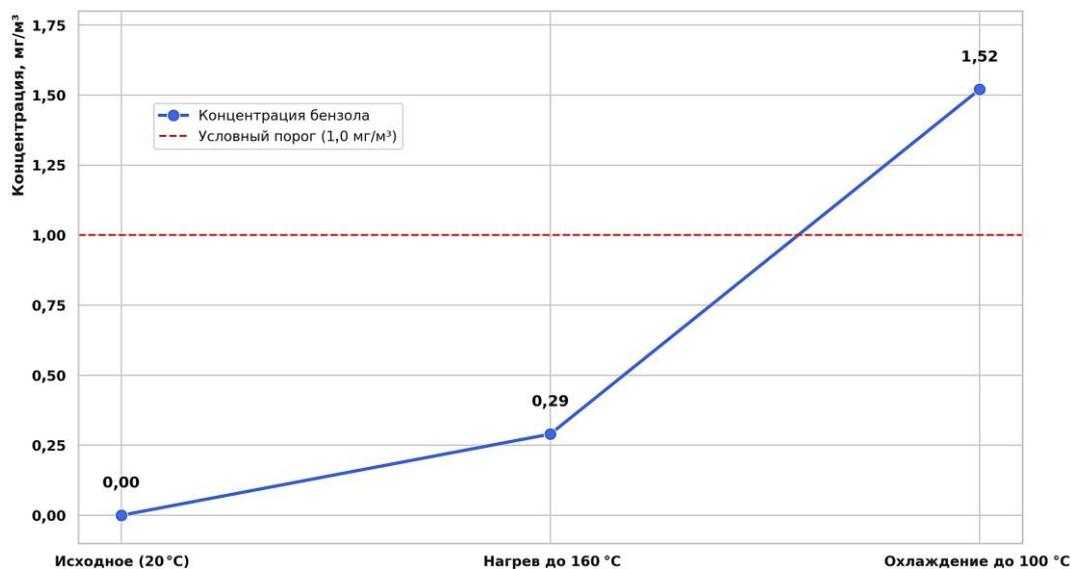


Рис. 2. Динамика концентрации бензола в Модели 2

ОЦЕНКА ЭМИССИИ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ДОРОЖНОГО БИТУМА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КЛЮЧЕВЫХ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Представленные данные наглядно демонстрируют, что оценка опасности эмиссии на основе суммарного показателя TVOC может приводить к неверным выводам. Так, пиковое значение TVOC в эксплуатационном режиме (78,46 мг/м³ в Модели 1) оказалось выше, чем максимальное значение в технологическом режиме (58,19 мг/м³). Однако качественный состав эмиссии в этих точках принципиально различен.

Для перехода от количественной оценки к оценке реального токсикологического риска был рассчитан безразмерный индекс токсикологической опасности (ИТО). В соответствии с пунктом 14 Санитарных норм и правил «Требования к контролю воздуха рабочей зоны» [29], при одновременном содержании в воздухе нескольких вредных веществ однонаправленного действия сумма отношений фактических концентраций к их ПДК не должна превышать единицы. На основе этого положения ИТО рассчитывается по формуле:

$$\text{ИТО} = \sum (C_i / \text{ПДК}_i),$$

где C_i – измеренная в эксперименте концентрация i -го вещества, мг/м³; ПДК_i – среднесменная предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны, мг/м³.

Значение ИТО, превышающее единицу, условно свидетельствует о превышении допустимого уровня суммарного токсического воздействия смеси. Нормативные значения ПДК для идентифицированных веществ, согласно гигиеническому нормативу «Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны» [30] представлены в табл. 3.

Таблица 3

Гигиенические нормативы для ключевых компонентов эмиссии

Вещество	Номер в перечне	ПДК, мг/м ³ (максимальная разовая / среднесменная)	Класс опасности
Ацетон	1900	800 / 200	4
Метанол	1347	15 / 5	3
Этилацетат	2572	200 / 50	4
Гексан	521	900 / 300	4
Толуол (метилбензол)	1364	150 / 50	3
Бензол	283	15 / 5	2 (канцероген)

Расчет ИТО был произведен для ключевых точек каждого эксперимента, где наблюдались максимальные значения TVOC. Результаты расчета представлены в табл. 4.

Как следует из данных табл. 4, несмотря на более низкое значение TVOC, технологический режим (Модель 2) характеризуется формированием сложной смеси из токсичных веществ, включая

канцерогенный бензол. В то же время высокий ИТО в эксплуатационном режиме (Модель 1) обусловлен преимущественно вкладом одного компонента – метанола. Оба режима демонстрируют значительное превышение условного порога опасности (ИТО > 1), однако, качественный состав риска в них принципиально различен.

Таблица 4

Расчет индекса токсикологической опасности (ИТО) для пиковых точек эмиссии

Параметр	Модель 1 Выдержка 8 ч при 60 °С	Модель 2 Охлаждение до 100 °С
TVOC, мг/м ³	78,46	58,19
Ключевые компоненты, формирующие риск	Ацетон, метанол	Этилацетат, гексан, бензол, метанол
ИТО, рассчитан по формуле	2,54	1,92

Обсуждение результатов

Полученные в настоящей работе данные, основанные на прямых инструментальных измерениях эмиссионного профиля, находятся в полном согласии с результатами, полученными авторами ранее при оценке свойств дорожных покрытий с использованием более фундаментальных подходов. В частности, термодинамический анализ, применяемый для комплексной оценки качества, эффективности и экологичности (environmental friendliness) асфальтобетона, также указывает на ключевую роль температурных режимов в формировании эксплуатационных характеристик и экологической безопасности покрытий [31, 32]. При этом настоящее исследование экспериментально детализирует один из важнейших аспектов этой экологичности, а именно, эмиссию токсичных летучих соединений, предоставляя количественную базу для моделей оценки риска. Полученные в ходе работы экспериментальные данные позволяют провести глубокий сравнительный анализ эмиссионных процессов, протекающих в дорожном битуме на ключевых стадиях его жизненного цикла, и выявить ряд нетривиальных закономерностей.

Анализ динамики эмиссии в эксплуатационном режиме (Модель 1) показал, что длительное низкотемпературное воздействие (8 ч при 60 °С) приводит не к простому испарению наиболее летучих фракций, а к сложным физико-химическим процессам. Первоначальный всплеск эмиссии при достижении 60 °С характеризуется выходом легколетучих кислородсодержащих соединений, вероятно, присутствующих в битуме в качестве остаточных растворителей или продуктов неглубокого окисления. Однако последующий десятикратный рост TVOC в процессе выдержки, обусловленный лави-

нообразным выделением ацетона и метанола, не может быть объяснен простым испарением. Более вероятным механизмом является термоокислительная деструкция более сложных компонентов битумной матрицы, в частности, смол и асфальтенов. При температуре 60 °С кинетика этих процессов невысока, но за 8 ч непрерывного воздействия накапливается достаточно энергии для разрыва слабых химических связей и образования низкомолекулярных продуктов, таких как кетоны и спирты. Полная перестройка профиля на стадии остывания, с исчезновением полярных ацетона и метанола (вероятно, за счет их обратной адсорбции на охлаждающихся поверхностях) и появлением неполярного гексана, свидетельствует о сложных процессах перераспределения компонентов в замкнутой системе «битум–парагазовая фаза».

Анализ технологического режима (Модель 2) выявил еще более важные с практической точки зрения закономерности. Пиковый нагрев до 160 °С ожидаемо приводит к интенсивной эмиссии, однако, ее состав (преобладание спиртов) говорит о том, что в первую очередь выделяются наиболее летучие и полярные компоненты. Ключевым открытием является тот факт, что максимальная суммарная эмиссия и, что более важно, максимальный токсикологический риск наблюдаются не при пиковой температуре, а на стадии остывания (160 → 100 °С). Этот, на первый взгляд, парадоксальный эффект объясняется кинетикой процесса. В течение трехчасового периода остывания продолжается интенсивная деструкция и десорбция компонентов из вязкой битумной матрицы. В отличие от открытых условий, где эти вещества немедленно рассеиваются, в описанном герметичном эксперименте они накапливались в парагазовой фазе. Именно этот эффект накопления и привел к росту итоговой концентрации.

Особую тревогу вызывает пятикратный рост концентрации бензола на стадии остывания. Данное явление можно объяснить двумя механизмами. Во-первых, это может быть результатом реакций деалкилирования более сложных ароматических соединений (например, толуола или ксилолов), которые интенсифицируются при высоких температурах. Во-вторых, это может быть связано с диффузионными ограничениями: при 160 °С более летучие спирты и кетоны испаряются быстрее, «экранируя» выход менее летучего бензола. В процессе остывания, когда интенсивность эмиссии спиртов падает, диффузия бензола к поверхности становится доминирующим процессом. Полученный результат имеет огромное практическое значение, поскольку указывает на то, что основная опасность для персонала дорожно-строительных бригад существует не только в момент выгрузки горячей сме-

си, но и в течение длительного времени при ее укладке и уплотнении.

Применение Индекса токсикологической опасности (ИТО) позволило окончательно доказать несостоятельность показателя TVOC как меры риска. Расчеты показали, что оба режима являются опасными (ИТО > 1). Однако высокий ИТО в эксплуатационном режиме (2,54) обусловлен в основном вкладом метанола, в то время как в технологическом режиме (ИТО = 1,92) опасность формируется сложной химической смесью из нескольких токсикантов, включая канцерогенный бензол. Это подтверждает, что с точки зрения долгосрочных рисков для здоровья, особенно канцерогенных, технологический режим представляет несравнимо большую угрозу.

Заключение

Выполнена количественная оценка и сравнительный анализ компонентного состава и интенсивности эмиссии ЛОС из дорожного битума марки 70/100 при моделировании эксплуатационной (длительный нагрев при 60 °С) и технологической (нагрев до 160 °С с остыванием до 100 °С) стадий жизненного цикла.

Установлено, что температурный режим и продолжительность его воздействия являются ключевыми факторами, определяющими не только интенсивность, но и качественный состав эмиссии. Продемонстрировано, что профиль эмиссии динамически изменяется на разных этапах нагрева и остывания.

Экспериментально доказано, что в технологическом режиме максимальная суммарная эмиссия ЛОС и, что более важно, максимальная концентрация высокотоксичного бензола наблюдаются не при пиковой температуре (160 °С), а на стадии остывания (100 °С) в результате накопления компонентов в замкнутом объеме.

Впервые предложен и применен подход к оценке опасности эмиссии на основе расчетного Индекса токсикологической опасности (ИТО), учитывающего индивидуальную токсичность компонентов. Доказано, что оценка риска на основе суммарного показателя TVOC может приводить к неверным заключениям.

Полученные количественные данные служат прямым научным обоснованием для минимизации температурного и временного воздействия на битум в дорожном строительстве. Результаты подтверждают высокую актуальность и необходимость приоритетного внедрения низкотемпературных (теплых и холодных) асфальтобетонных технологий, позволяющих значительно снизить температуру производства и укладки, и, как следствие, кардинально сократить эмиссию опасных веществ, минимизируя риски для здоровья персонала и населения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. World Road Statistics 2023 / International Road Federation (IRF). Geneva, 2023. URL : <https://www.irfnet.ch/world-road-statistics/> (дата обращения: 22.06.2025).
2. Health impacts of asphalt emissions: Examining neurological risks and the need for long-term exposure mitigation / E.H. Fini, F. Pahlavan, N.O. Vega [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. 2025. Vol. 486. P. 136849. doi:10.1016/j.jhazmat.2024.136849
3. Hazard review: health effects of occupational exposure to asphalt / M.A. Butler, G. Burr, D. Dankovic [et al.] // U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. Cincinnati, OH, 2000. 128 с. (DHHS (NIOSH) Publication. № 2001–110). URL : <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2001-110/pdfs/2001-110.pdf> (дата обращения: 22.06.2025).
4. VOCs characteristics and their relation with rheological properties of base and modified bitumens at different temperatures / M. Lei, S. Wu, G. Liu, S. Amirkhaniyan // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 160. P. 794–801. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.158
5. VOC emission analysis of bitumen using proton-transfer reaction time-of-flight mass spectrometry / J.B. Borinelli, J. Blom, M. Portillo-Estrada [et al.] // *Materials*. 2020. Vol. 13, № 17. Article № 3721. doi:10.3390/ma13173721
6. The investigation of volatile organic compounds (VOCs) emissions in environmentally friendly modified asphalt / S. Chen, J. Wang, Q. Li [et al.] // *Polymers*. 2022. Vol. 14, № 17. Article № 3459. doi:10.3390/polym14173459
7. Systems biology of asphalt pollutants and their human molecular targets / E. Rozewski, O. Taqi, E.H. Fini [et al.] // *Frontiers in Systems Biology*. 2023. Vol. 2. Art. 928962. doi:10.3389/fsysb.2022.928962
8. Physical and Chemical Characterization of Asphalt (Bitumen) Paving Exposures / R.F. Herrick, M.D. McClean, J.D. Meeker [et al.] // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, Suppl. 1. P. 209–216. doi:10.1080/15459620701334806
9. Walter D., Knecht U. Standardized Investigation of Percutaneous Absorption of Bitumen Emission in Humans // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, Suppl. 1. P. 144–153. doi:10.1080/15459620701354556
10. Assessing cancer hazards of bitumen emissions a case study for complex petroleum substances / A.J. Kriech, C.A. Schreiner, L.V. Osborn, A.J. Riley // *Critical Reviews in Toxicology*. 2018. Vol. 48, № 2. P. 121–142. doi:10.1080/10408444.2017.1391170
11. International Agency for Research on Cancer (IARC). Agents Classified by the IARC Monographs. Volumes 1–138. URL : <https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc> (дата обращения: 22.06.2025).
12. Fayerweather W.E. Meta-analysis of lung cancer in asphalt roofing and paving workers with external adjustment for confounding by coal tar // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, suppl. 1. Pp. 175–200. doi:10.1080/15459620701335035
13. Hansen E.S. Cancer incidence in an occupational cohort exposed to bitumen fumes // *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*. 1989. Vol. 15, № 2. P. 101–105. doi:10.5271/sjweh.1875
14. A case-control study of lung cancer nested in a cohort of European asphalt workers / A. Olsson, H. Kromhout, M. Agostini [et al.] // *Environmental Health Perspectives*. 2010. Vol. 118, № 10. P. 1418–1424. doi:10.1289/ehp.0901800
15. Occupational exposure during asphalt paving-comparison of hot and warm mix asphalt in field experiments / R. Olsen, P. Graff, H.L. Daae [et al.] // *Annals of Work Exposures and Health*. 2021. Vol. 65, № 4. Pp. 446–457. doi:10.1093/annweh/wxaa129
16. Assessment of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in Italian asphalt workers / P.E. Cirila, I. Martinotti, M. Buratti [et al.] // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, suppl. 1. Pp. 87–99. doi:10.1080/15459620701354325
17. Assessment of irritative effects of fumes of bitumen on the airways by using non-invasive methods – results of a cross-shift study in mastic asphalt workers / M. Raulf-Heimsoth, B. Pesch, A. Spickenheuer [et al.] // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, suppl. 1. P. 223–227. doi:10.1080/15459620701334798
18. Health complaints of German mastic asphalt workers / R. Rumler, R. Rühl, E. Nies [et al.] // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, suppl. 1. Pp. 233–236. doi:10.1080/15459620701337635
19. Induction of DNA adducts in vivo in rat lung cells by fume condensates of roofing asphalt / H.-W. Qian, T. Ong, J. Nath, W.-Z. Whong // *Teratogenesis, Carcinogenesis, and Mutagenesis*. 1998. Vol. 18. Pp. 131–140.
20. Effects of paving asphalt fume exposure on genotoxic and mutagenic activities in the rat lung / H.W. Zhao, X.J. Yin, D. Frazer [et al.] // *Mutation Research*. 2004. Vol. 557. Pp. 137–149. doi:10.1016/j.mrgentox.2003.10.006
21. Prophylactic efficacy of *Boerhavia diffusa* L. aqueous extract in toluene induced reproductive and developmental toxicity in *Drosophila melanogaster* / P.B. Benil, R. Sreeja, Y.O. Kim [et al.] // *Journal of Infection and Public Health*. 2020. Vol. 13. P. 177–185. doi:10.1016/j.jiph.2019.07.020
22. Temperature dependency of VOCs release characteristics of asphalt materials under varying test conditions / X. Chang, Y. Xiao, Y. Long [et al.] // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2022. Vol. 9, № 2. Pp. 280–292. doi:10.1016/j.jtte.2020.12.008
23. Urinary benzo[a]pyrene and its metabolites as molecular biomarkers of asphalt fume exposure characterized by microflow LC coupled to hybrid quadrupole time-of-flight mass spectrometry / J.J. Wang, D.G. Frazer, S. Stone [et al.] // *Analytical Chemistry*. 2003. Vol. 75, № 21. Pp. 5953–5960. doi:10.1021/ac030017a
24. Hirabayashi Y., Inoue T. Benzene-induced bone-marrow toxicity: A hematopoietic stem-cell-specific, aryl hydrocarbon receptor-mediated adverse effect // *Chemico-Biological Interactions*. 2010. Vol. 184. Pp. 252–258. doi:10.1016/j.cbi.2009.12.022
25. Adetutu A., Owoade A.O., Adegbola P.I. Inhibitory effects of ethyl acetate and butanol fractions from *Morinda lucida* benth on benzene-induced leukemia in mice // *Arabian Journal of Chemistry*. 2022. Vol. 15. Art. 103802. doi:10.1016/j.arabjc.2022.103802
26. Effect of temperature, fuming time, and distance from source on the polycyclic aromatic compound (PAC) content of bitumen fumes: assessment using a laboratory fuming protocol in combination with a sensitive method for determining relative aggregate levels of PACs in complex mixtures / G.R. Blackburn, W.T. Jr. Bleicher, S. Glidden, G. Reinke // *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2012. Vol. 32, № 2. Pp. 265–279. doi:10.1080/10406638.2012.668745
27. Alternatives for benzene in the extraction of bitumen fume from exposure sample media / B. Sutter, C. Ravera, C. Hussard, E. Langlois // *Annals of Occupational Hygiene*. 2016. Vol. 60, № 1. Pp. 101–112. doi:10.1093/annhyg/mev068

QUANTIFICATION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUND EMISSIONS FROM ASPHALT BINDER UNDER SIMULATED PRODUCTION AND IN-SERVICE CONDITIONS

28. СТБ EN 12591-2010. Битумы дорожные. Технические требования и методы испытаний. Введен впервые; введ. 01.08.2010. Минск : Госстандарт, 2010. 30 с.

29. Об утверждении Санитарных норм и правил «Требования к контролю воздуха рабочей зоны», гигиенических нормативов «Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны», «Ориентировочные безопасные уровни воздействия вредных веществ в воздухе рабочей зоны», «Предельно допустимые уровни загрязнения кожных покровов вредными веществами» и признании утратившими силу некоторых постановлений Министерства здравоохранения Республики Беларусь и постановления Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 28 октября 2004 г. № 94 : постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 11 октября 2017 г. № 92 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. 09.11.2017. № 8/32492.

30. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны: гигиенический норматив : утв. постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 11.10.2017 г. № 92 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. 09.11.2017. № 8/32492.

31. Thermodynamic Approaches in Assessing Quality, Efficiency and Environmental Friendliness of Asphalt Concrete / Q. Zhang, V.N. Romaniuk, Yu.G. Aliakseyeu, Q. How // *Science & Technique*. 2022. Vol. 21, № 6. Pp. 490–498. doi:10.21122/2227-1031-2022-21-6-490-498

32. Thermodynamic Aspects of Pavement Engineering / B.M. Khroustalev, T. Liu, Yu.G. Aliakseyeu [et al.] // *Science & Technique*. 2022. Vol. 21, № 1. Pp. 28–35. doi:10.21122/2227-1031-2022-21-1-28-35

REFERENCES

1. World Road Statistics 2023 / International Road Federation (IRF). Geneva, 2023. URL : <https://www.irfnet.ch/world-road-statistics/> (дата обращения: 22.06.2025).

2. Health impacts of asphalt emissions: Examining neurological risks and the need for long-term exposure mitigation / E.H. Fini, F. Pahlavan, N.O. Vega [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. 2025. Vol. 486. P. 136849. doi:10.1016/j.jhazmat.2024.136849

3. Hazard review: health effects of occupational exposure to asphalt / M.A. Butler, G. Burr, D. Dankovic [et al.] // U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. Cincinnati, OH, 2000. 128 с. (DHHS (NIOSH) Publication. № 2001–110). URL : <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2001-110/pdfs/2001-110.pdf> (дата обращения: 22.06.2025).

4. VOCs characteristics and their relation with rheological properties of base and modified bitumens at different temperatures / M. Lei, S. Wu, G. Liu, S. Amirkhaniyan // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 160. P. 794–801. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.158

5. VOC emission analysis of bitumen using proton-transfer reaction time-of-flight mass spectrometry / J.B. Borinelli, J. Blom, M. Portillo-Estrada [et al.] // *Materials*. 2020. Vol. 13, № 17. Article № 3721. doi:10.3390/ma13173721

6. The investigation of volatile organic compounds (VOCs) emissions in environmentally friendly modified asphalt / S. Chen, J. Wang, Q. Li, W. Zhang, C. Yan // *Polymers*. 2022. Vol. 14, № 17. Article № 3459. doi:10.3390/polym14173459

7. Systems biology of asphalt pollutants and their human molecular targets / E. Rozewski, O. Taqi, E.H. Fini [et al.] // *Frontiers in Systems Biology*. 2023. Vol. 2. Art. 928962. doi:10.3389/fsysb.2022.928962

8. Physical and Chemical Characterization of Asphalt (Bitumen) Paving Exposures / R.F. Herrick, M.D. McClean, J.D. Meeker [et al.] // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, Suppl. 1. P. 209–216. doi:10.1080/15459620701334806

9. Walter D., Knecht U. Standardized Investigation of Percutaneous Absorption of Bitumen Emission in Humans // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, Suppl. 1. P. 144–153. doi:10.1080/15459620701354556

10. Assessing cancer hazards of bitumen emissions a case study for complex petroleum substances / A.J. Kriech, C.A. Schreiner, L.V. Osborn, A.J. Riley // *Critical Reviews in Toxicology*. 2018. Vol. 48, № 2. P. 121–142. doi:10.1080/10408444.2017.1391170

11. International Agency for Research on Cancer (IARC). Agents Classified by the IARC Monographs. Volumes 1–138. URL : <https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc> (дата обращения: 22.06.2025).

12. Fayerweather W.E. Meta-analysis of lung cancer in asphalt roofing and paving workers with external adjustment for confounding by coal tar // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, suppl. 1. Pp. 175–200. doi:10.1080/15459620701335035

13. Hansen E.S. Cancer incidence in an occupational cohort exposed to bitumen fumes // *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*. 1989. Vol. 15, № 2. Pp. 101–105. doi:10.5271/sjweh.1875

14. A case-control study of lung cancer nested in a cohort of European asphalt workers / A. Olsson, H. Kromhout, M. Agostini [et al.] // *Environmental Health Perspectives*. 2010. Vol. 118, № 10. P. 1418–1424. doi:10.1289/ehp.0901800

15. Occupational exposure during asphalt paving-comparison of hot and warm mix asphalt in field experiments / R. Olsen, P. Graff, H.L. Daae [et al.] // *Annals of Work Exposures and Health*. 2021. Vol. 65, № 4. Pp. 446–457. doi:10.1093/annweh/wxaa129

16. Assessment of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in Italian asphalt workers / P.E. Cirila, I. Martinotti, M. Buratti [et al.] // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, suppl. 1. Pp. 87–99. doi:10.1080/15459620701354325

17. Assessment of irritative effects of fumes of bitumen on the airways by using non-invasive methods – results of a cross-shift study in mastic asphalt workers / M. Raulf-Heimsoth, B. Pesch, A. Spickenheuer [et al.] // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, suppl. 1. P. 223–227. doi:10.1080/15459620701334798

18. Health complaints of German mastic asphalt workers / R. Rumler, R. Rühl, E. Nies [et al.] // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, suppl. 1. Pp. 233–236. doi:10.1080/15459620701337635

19. Induction of DNA adducts in vivo in rat lung cells by fume condensates of roofing asphalt / H.-W. Qian, T. Ong, J. Nath, W.-Z. Whong // *Teratogenesis, Carcinogenesis, and Mutagenesis*. 1998. Vol. 18. Pp. 131–140.

20. Effects of paving asphalt fume exposure on genotoxic and mutagenic activities in the rat lung / H.W. Zhao, X.J. Yin, D. Frazer [et al.] // *Mutation Research*. 2004. Vol. 557. Pp. 137–149. doi:10.1016/j.mrgentox.2003.10.006

21. Prophylactic efficacy of *Boerhavia diffusa* L. aqueous extract in toluene induced reproductive and developmental toxicity in *Drosophila melanogaster* / P.B. Benil, R. Sreeja, Y.O. Kim [et al.] // *Journal of Infection and Public Health*. 2020. Vol. 13. P. 177–185. doi:10.1016/j.jiph.2019.07.020
22. Temperature dependency of VOCs release characteristics of asphalt materials under varying test conditions / X. Chang, Y. Xiao, Y. Long [et al.] // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2022. Vol. 9, № 2. Pp. 280–292. doi:10.1016/j.jtte.2020.12.008
23. Urinary benzo[a]pyrene and its metabolites as molecular biomarkers of asphalt fume exposure characterized by microflow LC coupled to hybrid quadrupole time-of-flight mass spectrometry / J.J. Wang, D.G. Frazer, S. Stone [et al.] // *Analytical Chemistry*. 2003. Vol. 75, № 21. Pp. 5953–5960. doi:10.1021/ac030017a
24. Hirabayashi Y., Inoue T. Benzene-induced bone-marrow toxicity: A hematopoietic stem-cell-specific, aryl hydrocarbon receptor-mediated adverse effect // *Chemico-Biological Interactions*. 2010. Vol. 184. Pp. 252–258. doi:10.1016/j.cbi.2009.12.022
25. Adetutu A., Owoade A.O., Adegbola P.I. Inhibitory effects of ethyl acetate and butanol fractions from *Morinda lucida* benth on benzene-induced leukemia in mice // *Arabian Journal of Chemistry*. 2022. Vol. 15. Art. 103802. doi:10.1016/j.arabjc.2022.103802
26. Effect of teimperature, fuming time, and distance from source on the polycyclic aromatic compound (PAC) content of bitumen fumes: assessment using a laboratory fuming protocol in combination with a sensitive method for determining relative aggregate levels of PACs in complex mixtures / G.R. Blackburn, W.T. Jr. Bleicher, S. Glidden, G. Reinke // *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2012. Vol. 32, № 2. Pp. 265–279. doi:10.1080/10406638.2012.668745
27. Alternatives for benzene in the extraction of bitumen fume from exposure sample media / B. Sutter, C. Ravera, C. Hussard, E. Langlois // *Annals of Occupational Hygiene*. 2016. Vol. 60, № 1. Pp. 101–112. doi:10.1093/annhyg/mev068
28. STB EN 12591-2010. Bitумы дорожные. Технические требования и методы испытаний. [STB EN 12591-2010. Paving Grade Bitumens. Technical requirements and testing methods] Введен впервые; введ. 01.08.2010. Минск : Gosstandart, 2010. 30 с.
29. Об утверждении Санитарных норм и правил «Требования к контролю воздуха рабочей зоны», гигиенических нормативов «Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны», «Ориентировочные безопасные уровни воздействия вредных веществ в воздухе рабочей зоны», «Предельно допустимые уровни загрязнения кожных покровов вредными веществами» и признании утратившими силу некоторых постановлений Министерства здравоохранения Республики Беларусь и постановления Главного санитарного врача Республики Беларусь от 28 октября 2004 г. № 94» [On Approval of Sanitary Norms and Rules «Requirements for Control of the Working Area Air», Hygienic Standards «Maximum Permissible Concentrations of Harmful Substances in the Air of the Working Area», «Maximum Permissible Levels of Skin Contamination by Harmful Substances» and acknowledging void certain decrees of Ministry of Health of the Republic of Belarus and the decree of the Chief Sanitary Inspector of the Republic of Belarus № 94 dated 28/11/2004] : postanovlenie Ministerstva zdravooohraneniya Respubliki Belarus ot 11 oktyabrya 2017 g. № 92 // Natsional'ny pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus. 09.11.2017, № 8/32492.
30. Predel'no dopustimye konsentratsii vrednykh veshchestv v vozduke rabochej zony: gigienicheskij normativ [Hygienic Standard «Maximum Permissible Concentrations of Harmful Substances in the Air of the Working Area»] : utv. postanovleniem Ministerstva zdravooohraneniya Respubliki Belarus ot 11.10.2017 g. № 92 // Natsional'ny pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus. 09.11.2017, № 8/32492.
31. Thermodynamic Approaches in Assessing Quality, Efficiency and Environmental Friendliness of Asphalt Concrete / Q. Zhang, V.N. Romaniuk, Yu.G. Aliakseyeu, Q. How // *Science & Technique*. 2022. Vol. 21, № 6. Pp. 490–498. doi:10.21122/2227-1031-2022-21-6-490-498
32. Thermodynamic Aspects of Pavement Engineering / B.M. Khroustalev, T. Liu, Yu.G. Aliakseyeu [et al.] // *Science & Technique*. 2022. Vol. 21, № 1. Pp. 28–35. doi:10.21122/2227-1031-2022-21-1-28-35

Информация об авторах

Ю.Г. Алексеев – кандидат технических наук, ведущий специалист;
А.А. Афанасенко – научный сотрудник;
П.П. Яцевич – научный сотрудник;
Лю Тингуо – руководитель компании;
Ли Чжунюй – директор.

Information about the authors

Y.G. Aliakseyeu – Candadate of Science (Engineering), Senior Expert;
A.A. Afanasenka – Research Scientist;
P.P. Yatsevich – Research Scientist;
Liu Tingguo – Founder & CEO;
Li Zhongyu – Director.

Статья поступила в редакцию 09.06.2025; одобрена после рецензирования 30.06.2025; принята к публикации 30.06.2025.
The article was submitted: 09.06.2025; approved after reviewing: 30.06.2025; accepted for publication: 30.06.2025.

Научная статья
УДК 656.2:656.6(571.6)
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-16-22

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

Богданов Андрей Иванович¹, Нестерова Наталья Станиславовна², Тесленко Ирина Михайловна³

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

¹ abogdanov561@yandex.ru

² my@mer-maid2.ru

³ teslenkoim@yandex.ru

Аннотация: актуальность статьи обусловлена проблемой дальнейшего развития транспортной сети для промышленно-экономического освоения Дальневосточного федерального округа, в том числе разработки огромных запасов полезных ископаемых. Для решения данной проблемы сделан анализ существующей транспортной сети, представленной Северным морским путем, железными дорогами БАМ и Транссиб, и автомобильными дорогами «Витим», «Лена» и «Колыма». На основе результатов анализа даны предложения по развитию транспортной сети для освоения запасов полезных ископаемых с учетом строительства новой железной дороги Якутск – Магадан и развития Северного морского пути. Это позволит создать многовидовую транспортную сеть для освоения как прибрежных, так и, главным образом, внутренних районов ДФО и прилегающих регионов Сибирского федерального округа.

Ключевые слова: Дальневосточный федеральный округ, промышленно-экономическое освоение, многовидовая транспортная сеть, северный завоз, Северный морской путь, новая железная дорога Якутск–Магадан, полезные ископаемые

Original article

CURRENT STATE AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT NETWORK OF THE FAR EASTERN FEDERAL DISTRICT

Bogdanov Andrey I.¹, Nesterova Natalia S.², Teslenko Irina M.³

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

¹ abogdanov561@yandex.ru

² my@mer-maid2.ru

³ teslenkoim@yandex.ru

Abstract. The relevance of the article is due to the problem of further development of the transport network for the industrial and economic development of the Far Eastern Federal District, including the development of huge mineral reserves. To solve this problem, an analysis of the existing transport network was made, represented by the Northern Sea Route, the railways of the Baikal-Amur Mainline and the Trans-Siberian Railway, and the highways: Vitim, Lena and Kolyma. Based on the results of the analysis, proposals were given concerning the development of a transport network for exploitation of mineral reserves taking into account the construction of a new Yakutsk-Magadan railway and the development of the Northern Sea Route. This will create a multi-mode transport network for the development of both coastal and mainly, the interior areas of the Far Eastern Federal District and adjacent regions of the Siberian Federal District.

Keywords: Far Eastern Federal District, industrial and economic development, transport network, northern delivery, Northern Sea Route, new Yakutsk–Magadan railway, minerals

Дальневосточный федеральный округ образован Указом президента РФ от 13 мая 2000 г. № 849, занимает площадь 6 952 555 км², что составляет 40,6 % территории России. Географическое положение ДФО перед другими регионами России имеет ряд преимуществ, таких как богатство природных ресурсов (нефть, газ, алмазы, золото, металлы, каменный уголь и др.), наличие кратчайших транспортных маршрутов в АТР, протяженное морское побережье и внешняя граница как возможность социально-экономического сотрудничества, выход

к двум океанам и развитая инфраструктура. Основное богатство ДФО – полезные ископаемые, значительная часть которых расположена на Севере и Северо-Востоке ДФО.

Существующая транспортная сеть ДФО явно недостаточна для перспективного промышленно-экономического освоения территории и природных ресурсов.

Сеть железных дорог в ДФО практически отсутствует и представлена наиболее крупными: Транссибом, построенным более 100 лет назад и перегру-

женным в стоящее время; БАМом – Хани–Комсомольск-на-Амуре–Советская Гавань, поделенным между ДВОСТЖД и ВСИБЖД; АЯМом – Беркамит–Томмот–Якутск.

Этот вывод очевиден при сравнении сети железных дорог Европейской и Азиатской частей России (рис. 1). При этом на схеме уже показаны перспективные направления, которых в настоящее время нет [1].

Из сказанного выше следует, что отсутствие разветвленной и многовидовой транспортной сети значительно сдерживает темпы развития ДФО и тем самым представляет собой достаточно сложную и важную государственную проблему.

Анализ последних проектов по развитию транспортной сети ДФО показывает их нерациональность. Достаточно упомянуть «Подъездной путь к Эльгинскому месторождению углей» – Улак–Эльга (рис. 1). Согласно требованиям СП [2] каждая проектируемая железная дорога должна рассматриваться как новое звено перспективной сети железных дорог. «Подъездной путь к Эльгинскому месторождению углей» Улак–Эльга не имеет продолжения в топологии развития сети железных дорог в первой половине XXI в. Сложный план и продольный профиль дороги, а также неблагоприятные природные условия, способствующие развитию деформаций земляного полотна, приводят к авариям в движении поездов, которые происходят как летом, так и зимой.

Кроме Улак–Эльга к проблемным проектируемым железным дорогам следует отнести Трансполярную магистраль от Норильска до Тикси и Верхнеколымска и далее на Чукотку в Уэлен, железные дороги на Камчатку и вдоль побережья Охотского моря (рис. 1).

Не менее проблематична проектируемая железная дорога Якутск–Магадан протяженностью около 2000 км, озвученная стоимость строительства которой составляет 1,7 трлн руб., планируемая с 2023 по 2035 гг. [3]. Принятый вариант новой железной дороги Якутск–Магадан без захода в порт Охотск не решает насущной проблемы северного завоза в северные районы Хабаровского края. Кроме того, порт-дублер Охотск мог бы брать на себя грузопотоки в случае сбоев в работе порта Магадан. Аналогично, в случае отказов в работе порта Охотск, грузы можно было бы направлять в порт Магадан.

Принятому варианту предлагается конкурентное направление новой железной дороги Якутск – Хандыга – Охотск – Магадан, которое по предварительным оценкам имеет длину на 456 км меньше, чем железная дорога без захода в Охотск. При средней стоимости строительства 1 км дороги, равной 1 млрд руб., её стоимость будет на 456 млрд руб. меньше, срок строительства будет также меньше проектного на 5–7 лет, и экспортные грузы пойдут на внешний рынок в страны Азиатско-Тихоокеанского региона на 5–7 лет раньше. Это, в свою очередь, позволит раньше окупить капитальные затраты на строительство дороги.



Рис. 1. Перспективная топология развития сети железных дорог в первой половине XXI в.

Анализ проектируемого варианта Северо-Сибирской железной дороги (рис. 2) длиной около 2000 км и стоимостью около 8 трлн руб. (что более чем в 4 раза выше, чем стоимость железной дороги Якутск–Магадан) показывает, что данный вариант также не даст серьезный толчок развитию Восточной Сибири и тем более ДФО.

Основными причинами тому являются достаточно близкое расположение к Транссибу и выход на БАМ на станции Хребтовая. Кроме того, строительство Северо-Сибирской железной дороги на южной окраине Сибири и Дальнего Востока не позволит начать широкое освоение природных богатств центральных и северных регионов Дальнего Востока, строительство новой и развитие существующей инфраструктуры.

Общим для всех этих проектов является их колоссальная стоимость, обусловленная чрезвычайно сложными природными условиями, что, в свою очередь, не дает принять решение о начале строительства этих дорог.

Сеть автомобильных дорог также практически отсутствует. Из существующих следует отметить автодороги «Витим», «Лена», «Колыма», автодублер БАМа, каждая из которых требует больших затрат на капитальный ремонт и реконструкцию. В более удовлетворительном состоянии находятся автодороги Хабаровск–Чита, Хабаровск–Владивосток, Хабаровск–Селихин–Николаевск-на-Амуре.

В настоящее время большое значение для развития транспортной сети ДФО приобретает дальнейшее развитие Северного морского пути (СМП), который используется в основном для перевозки СПГ и нефти.

Существующая логистическая схема перевозки грузов по Северному морскому пути не имеет до-

статочного значения для промышленно-экономического развития ДФО. На побережье Северного ледовитого океана в границах ДФО имеется всего два морских порта: Тикси и Певек, расстояние между которыми составляет около 2000 км.

В навигацию 2024 г. общий грузооборот морского порта Тикси (Якутия) составил 661,8 тыс. т [4]. Основная часть завозимых грузов в этом году составила нефтепродукты – более 195 тыс. т, уголь – около 92 тыс. т и генеральные грузы – более 84 тыс. т.

Общий грузооборот морского порта Певек в навигацию 2024 г. превысил 555 тыс. т, что на 35 тыс. т больше, чем в 2023 г. [5]. Таким образом, рост составил около 7 %. Из общего объема грузов уголь составил 3 тыс. т, щебень – 18,2 тыс. т, генеральные грузы – 234,65 тыс. т, нефтепродукты – 177,6 тыс. т, контейнеры – 7225 TEU. Такие размеры грузооборота по Северному морскому пути более чем в 3–4 раза меньше грузооборота узкоколейной железной дороги.

При этом железнодорожные подходы к данным портам отсутствуют, что делает невозможным перевозки массовых грузов по СМП для нужд ДФО.

Грузы для освоения природных богатств и территории ДФО по Северному морскому пути везутся через порт Петропавловск-Камчатский до портов Владивостока или Находки. Далее грузы назначением для внутренних районов ДФО доставляются по железной дороге Находка–Сковородино–Тында–Беркалит–Томмот–Якутск на расстояние около 2500 км. Станция назначения Якутск находится практически в центре ДФО, дальнейшее перемещение массовых грузов по федеральным автомобильным дорогам «Витим», «Лена» и «Колыма» в необходимых размерах практически невозможно.



Рис. 2. Схема Северо-Сибирской железной дороги

Альтернативным решением представляется проектирование и строительство субмеридиональных железных дорог между СМП и БАМ и Транссибом, по аналогии с железной дорогой Тобольск–Сургут–Уренгой. Расстояния от Тикси до Якутска и от Певека до Магадана равны, соответственно, 1000 и 1500 км, на всей территории практически отсутствует надежная транспортная связь. Предлагаемые направления показаны на рис. 3 штрихпунктирными линиями красного цвета и тяготеют к крупным месторождениям полезных ископаемых: нефти и газа, железа, угля, золота и других редких металлов.

Например, в качестве первых следует оценить экономическую эффективность проектирования железных дорог Тикси (СМП)–Якутск–Тында (БАМ)–Сковородино (Транссиб), Тикси (СМП)–Усть-Нера–Магадан с использованием участка Тикси–Якутск,

Певек–Верхнеколымск–Магадан, Новый порт Хатанга–Мирный–Таксимо (БАМ), а также Диксон (СМП)–Карабула–Решеты (Транссиб, Сибирский Федеральный округ).

Принятому варианту железной дороги Якутск–Хандыга–Магадан предложен конкурентный вариант Якутск–Хандыга–Охотск–Магадан, который обеспечивает:

- экономию затрат на перевозку экспортных грузов к портам Охотского моря и далее в страны Юго-Восточной Азии;
- более рациональные транспортные связи в северных районах ДФО;
- дальнейшее более рациональное развитие транспортной сети ДФО;
- меньшую длину и стоимость, тем самым меньшую продолжительность строительства.

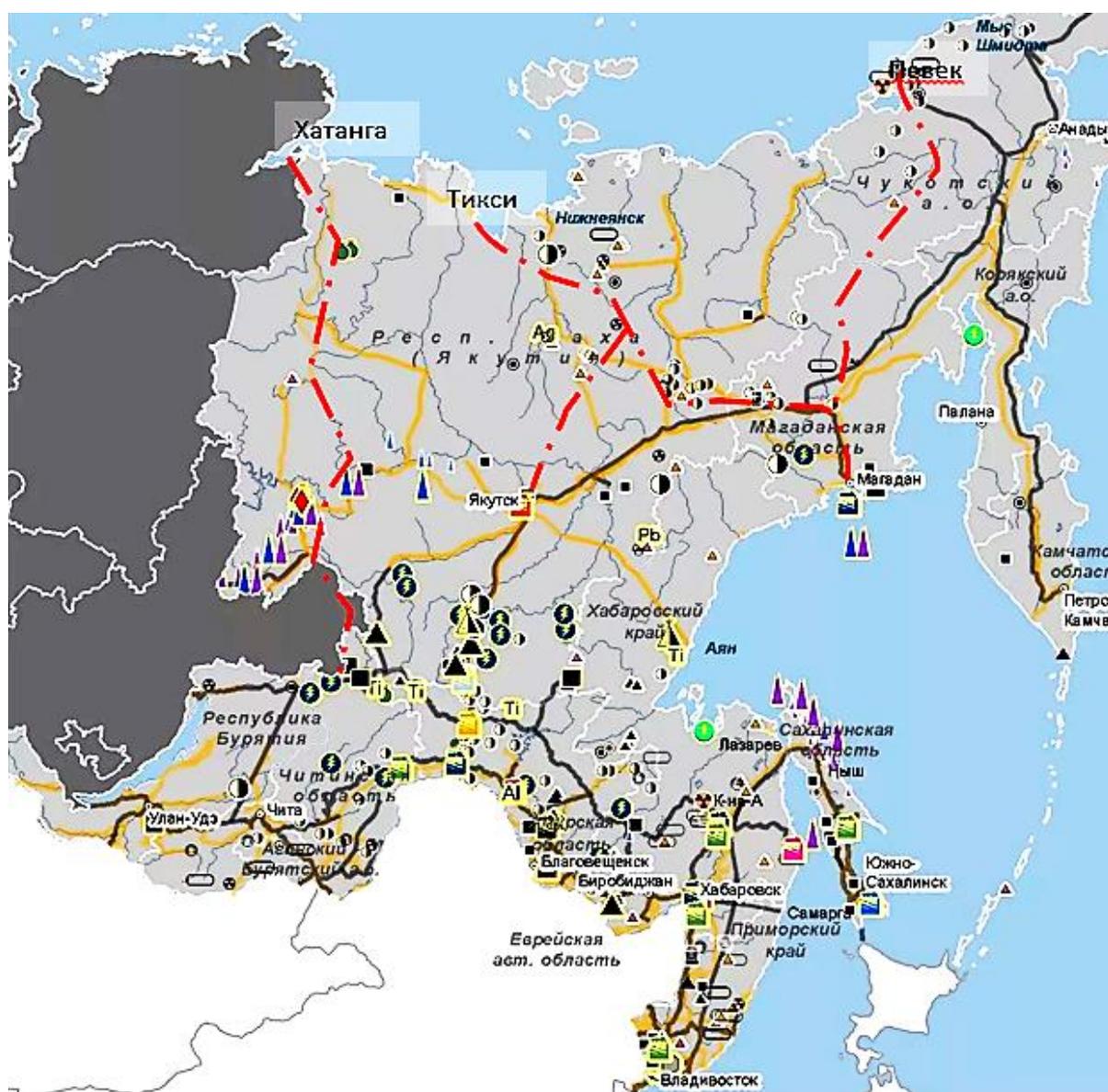


Рис. 3. Предлагаемые железнодорожные подходы к портам СМП

Дорогу на Камчатку предлагается запроектировать и построить от Магадана и совместить с плотиной, проектируемой Пенжинской приливной ЭС.

В продолжение сказанному следует отметить затянувшуюся на 30 лет (начиная с 90-х гг. прошлого века) и продолжающуюся по Федеральной программе «Восточный коридор» реконструкцию Транссиба, вследствие чего Китай создал выход в Европу через Казахстан.

Время в пути по Транссибу по маршруту Находка–Петропавловск–Хельсинки практически вдвое больше, чем по маршруту Ляньюньгань–Петропавловск–Брест–Гамбург, причем Китайский маршрут длиннее на почти 500 км. Также Транссиб не входит в состав высокоскоростного транспортного коридора Китай–Европа по причине низких скоростей движения поездов 60–90 км/ч.

Аналогичное положение с дискутируемой уже более 20 лет с 2000-х гг. (а в целом, с 40-х гг. прошлого века) проблемой проектирования железной дороги на остров Сахалин, после начала строительства которой Япония построит тоннель Хоккайдо–Сахалин и которая могла бы стать международным транспортным коридором 3 (МТК-3) с увеличением импортных грузопотоков по БАМу в Западную Европу.

Востребованность транспортного сообщения с Сахалином можно обосновать по аналогии с автомобильным мостовым переходом через реку Амур у Хабаровска, до строительства которого паромом перевозилось несколько десятков автомобилей в сутки. В настоящее время по мосту проходит более 10 000 автомобилей в сутки с назначением перевозок по всей территории России, включая Москву и Санкт-Петербург.

Такое положение дел обусловлено, вероятно, отсутствием научно обоснованной комплексной стратегии развития транспортной сети ДФО. Подтверждением тому является строительство частной Тихоокеанской железной дороги с целью вывоза Эльгинских углей, для чего была построена железная дорога Улак–Эльга, которая после строительства Тихоокеанской железной дороги, вероятно, утратит свое назначение. Кроме Улак–Эльга к проблемным проектируемым железным дорогам следует отнести Трансполярную магистраль от Норильска до Верхнеколымска и далее на Чукотку в Уэлен, железные дороги на Камчатку и вдоль побережья Охотского моря.

Анализ существующей транспортной сети и, главным образом, планируемое развитие Северного морского пути (СМП) показывает, что вся территория ДФО между Северным морским путем и железными дорогами БАМ и Транссиб не имеет достаточно надежной и разветвленной транспортной сети. Транспортная доступность внутренних районов от Енисея и до Тихоокеанского побережья, удаленных от транспортных артерий более чем на 1000 км, остается практически нулевой. Проектируемая Трансполярная магистраль, являющаяся железнодорожным дублером СМП, также не решает эту проблему. Следовательно, необходимо строительство новых морских портов в устье рек Хатанги и Колымы или Индигирки и субмеридиональных железных дорог между СМП и БАМ и Транссибом, по аналогии с железной дорогой Тобольск–Сургут–Уренгой (рис. 4).



Рис. 4. Предлагаемая сеть перспективных железных дорог Сибирского и Дальневосточного федеральных округов

Хороший импульс развитию регионов Сибири и особенно Дальнего Востока могут дать принятые ранее и предлагаемые в данной статье направления для формирования перспективной сети железных дорог Дальневосточного и Сибирского федеральных округов, которые тяготеют к крупным месторождениям полезных ископаемых: нефти и газа, железа, угля, золота и других редких металлов. Например, в качестве первых следует оценить экономическую эффективность проектирования железных дорог Тикси (СМП)–Якутск–Тында (БАМ)–Сковородино (Транссиб), Тикси (СМП)–Усть-Нера–Магадан. Дорогу на Камчатку предлагается запроектировать и построить от Магадана и совместить с плотиной, проектируемой Пенжинской приливной ГЭС. Таким образом, по мере освоения территории после строительства субмеридиональных дорог на первом этапе, на втором этапе могут быть построены связующие участки железных дорог субширотного направления (красные пунктирные линии на рис. 4).

К участкам предлагаемой перспективной сети железных дорог Дальневосточного и Сибирского федеральных округов относятся:

- 1) участок Хандыга–Усть-Нера–Сусуман–Магадан и далее в Петропавловск-Камчатский как часть рассмотренного выше принятого варианта новой железной дороги Якутск–Магадан, позволит сформировать еще одну ячейку сети железных дорог ДФО;
- 2) участок Усть-Нера–Верхнеколымск–Анжуй–Уэлен с выходом на Чукотку, который вместе с предыдущим участком будет являться осью перспективной сети железных дорог ДФО;
- 3) участок Анжуй–Уэлен сети железных дорог ДФО;

4) участки Тикси–Хандыга, Усть-Нера–Сусуман–Магадан и Певек–Анжуй–Анадырь для развития топологии перспективной сети железных дорог ДФО и Северного морского пути в первой половине XXI в.;

5) участок Курейка–Тура–Мирный–Кемпендяй Сибирского федерального округа;

6) участок Таксимо–Кемпендяй Сибирского федерального округа;

7) участок Дудинка (СМП)–Курейка–Карабула и далее на станцию Решеты на Транссибе Сибирского федерального округа;

8) строительство новых портов Хатанга и Колыма на Северном морском пути в устье одноименных рек Хатанга и Колыма, и далее участков Хатанга–Мирный–Кемпендяй–Бодайбо–Таксимо Сибирского и Колыма–Верхнеколымск Дальневосточного федеральных округов.

Таким образом, предложенная схема развития сети железных дорог Дальневосточного, Сибирского федеральных округов и Северного морского пути требует производства технико-экономического обоснования на основе определения строительной стоимости и расходов по эксплуатации и на этой основе срока окупаемости капитальных вложений. Предлагаемая перспективная транспортная сеть позволит значительно ускорить хозяйственное освоение Дальневосточного и Сибирского федеральных округов и увеличить объемы перевозок грузов по Северному морскому пути, что совместно со строительством новых и реконструкцией существующих автомобильных дорог («Виллюй», «Лена», «Колыма») в конечном итоге позволит сформировать достаточно надежную и разно видовую транспортную сеть ДФО.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия развития сети железных дорог Российской Федерации до 2030 г. Москва : ОАО «РЖД», 2007. 36 с.
2. СП 237.1326000.2015. Инфраструктура железнодорожного транспорта. Общие требования. Свод правил. Дата регистрации 30 июля 2015 г.
3. Строительство железной дороги из Якутска в Магадан планируют начать в 2024 г. // Сетевое СМИ. URL : <https://magadanpravda.ru/lenta-novostej/stroitelstvo/stroitelstvo-zheleznoj-dorogi-iz-yakutska-v-magadan-planiruyut-nachat-v-2024-godu> (дата обращения: 12.06.2025).
4. Обзор грузооборота порта Тикси в навигацию 2024 г. URL : <https://маякарктики.рф/obzor-gruzooborota-porta-tiksi-v-> (дата обращения: 12.06.2025).
5. Грузооборот порта Певек в навигацию 2024 г. вырос на 7 % – до более 550 тыс. т. URL : <https://portnews.ru/news/371185/> (дата обращения: 12.06.2025).

REFERENCES

1. Strategiya razvitiya seti zheleznyh dorog Rossijskoj Federatsii do 2030 g. [Strategy for the development of the railway network of the Russian Federation until 2030]. Moskva : ОАО «RZhD», 2007. 36 s.
2. SP 237.1326000.2015. Infrastruktura zheleznodorozhnogo transporta. Obshchie trebovaniya. Svod pravil [SP 237.1326000.2015. Railway Transport Infrastructure. General Requirements. Code of Rules]. Data registratsii 30 iyulya 2015 g.
3. Stroitel'stvo zheleznoj dorogi iz Yakutska v Magadan planiruyut nachat' v 2024 g. [Construction of the railway from Yakutsk to Magadan is planned to start in 2024] // Setevoe SMI. URL : <https://magadanpravda.ru/lenta-novostej/stroitelstvo/stroitelstvo-zheleznoj-dorogi-iz-yakutska-v-magadan-planiruyut-nachat-v-2024-godu> (data obrashcheniya: 12.06.2025).
4. Obzor gruzooborota porta Tiksi v navigatsiyu 2024 g. [Review of cargo turnover in Tiksi port in 2024 navigation season] URL : <https://маякарктики.рф/obzor-gruzooborota-porta-tiksi-v-> (data obrashcheniya: 12.06.2025).
5. Guzooborot porta Pevek v navigatsiyu 2024 g. vyros na 7 % – do bolee 550 tys. tonn. [Cargo turnover in Pevek port in 2024 navigation season grew 7 % – to more than 550 thous. tons] URL : <https://portnews.ru/news/371185/> (data obrashcheniya: 12.06.2025).

Информация об авторах

А.И. Богданов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Изыскания и проектирование железных и автомобильных дорог»;

Н.С. Нестерова – доктор технических наук, профессор кафедры «Изыскания и проектирование железных и автомобильных дорог»;

И.М. Тесленко – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность».

Information about the authors

A.I. Bogdanov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Survey and Design of Railways and Highways;

N.St. Nesterova – Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Survey and Design of Railways and Highways;

I.M. Teslenko – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Technosphere Safety.

Статья поступила в редакцию 15.05.2025; одобрена после рецензирования 03.06.2025; принята к публикации 16.06.2025.

The article was submitted: 15.05.2025; approved after reviewing: 03.06.2025; accepted for publication: 16.06.2025.

Научная статья
УДК 656.212.7
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-23-30

АНАЛИЗ ПРИЧИН ПРОСТОЯ ВАГОНОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЯХ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Гришкова Диана Юрьевна¹, Молодин Дмитрий Максимович²

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

¹ raigas@inbox.ru;

² molodin01@mail.ru

Аннотация. Проведён анализ железнодорожных путей необщего пользования, которые представляют собой совокупность производственно-технических комплексов и инфраструктуры, необходимой для обслуживания клиентов железнодорожного транспорта. Важность этих путей заключается в удовлетворении потребностей как физических, так и юридических лиц, а также государства, в операциях, связанных с грузовыми перевозками. Основные задачи, стоящие перед железнодорожными путями необщего пользования, включают экономические и социальные аспекты выполнения приемосдаточных операций, осмотра и сортировки вагонов, их погрузки и выгрузки. Анализируется текущее состояние системы управления эксплуатацией путей необщего пользования, с выявлением всевозможных проблем, приводящих к увеличению времени пребывания вагонов на путях клиентов. Также уделяется внимание важности оптимизации маневровых операций и управления резервами времени, что может существенно снизить простои вагонов и улучшить ритмичность грузовых операций.

Ключевые слова: железнодорожный путь необщего пользования, простой вагонов, дерево причин простоя вагонов, блок-схема обслуживания путей необщего пользования, маневровые операции

Original article

ANALYSIS OF THE REASONS FOR CARS' DOWNTIME ON NON-PUBLIC RAILWAY TRACKS

Grishkova Diana Y.¹, Molodin Dmitry M.²

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

¹ raigas@inbox.ru;

² molodin01@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the analysis of non-public railway tracks, which are a set of production and technical complexes and infrastructure necessary for servicing rail transport customers. The importance of these tracks lies in meeting the needs of both individuals and legal entities, as well as the state, in operations related to freight transportation. The main tasks facing non-public railway tracks include both economic and social aspects through the implementation of transfer-and-acceptance operations, inspection and sorting of cars, their loading and unloading. The article analyzes the current state of the non-public track operation management system, identifying all sorts of problems leading to an increase in the time spent by cars on customer tracks. Attention is also paid to the importance of optimizing shunting operations and managing time reserves, which can significantly reduce car downtime and improve the rhythm of freight operations.

Keywords: non-public railroad track, railcar downtime, railcar downtime cause tree, block diagram of non-public railroad track maintenance, shunting operations

Введение

Железнодорожный транспорт является одним из ключевых компонентов логистической инфраструктуры, обеспечивающим перемещение грузов на большие расстояния с высокой эффективностью. В последние десятилетия наблюдается значительный рост объемов грузоперевозок, что, в свою очередь, ставит перед операторами и владельцами подвижного состава новые задачи, связанные с оптимизацией процессов транспортировки. Особую актуальность приобретают проблемы, связанные с обслуживанием железнодорожных путей необщего пользования, ко-

торые играют важную роль в обеспечении бесперебойного и эффективного грузового движения.

На фоне вышеизложенного вопросы, касающиеся задержек в подаче и уборке вагонов, становятся предметом глубокого анализа и исследования. Задержки могут вызывать значительные экономические потери как для самих операторов, так и для клиентов, что делает важным понимание причин их возникновения и поиск путей оптимизации [2, 4]. Среди основных факторов, влияющих на время простоя вагонов, можно выделить неравномерность размеров движения грузовых поездов, несогласо-

вание графиков подачи и уборки вагонов, а также колебания в объемах погрузки и выгрузки, обусловленные сезонными изменениями спроса.

Согласно исследованиям количество вагонов, находящихся у собственников подвижного состава, влияет на время их простоя, что связано с перегрузкой инфраструктуры и недостаточной пропускной способностью [5]. Данные показывают, что 80 % из 615 тыс. исследованных вагонов принадлежат крупным собственникам, что подчеркивает их значительное влияние на общий объем грузоперевозок и, соответственно, на эффективность работы железнодорожного транспорта в целом [5].

Настоящая статья предлагает анализ проблем обслуживания железнодорожных путей необщего пользования и конкретные меры, направленные на устранение выявленных недостатков, что в конечном итоге должно привести к улучшению динамики оборота вагонов и повышению производительности труда в железнодорожной отрасли.

Объект и методы исследования

Объект исследования – железнодорожные пути необщего пользования, а также процессы, связанные с обслуживанием и эксплуатацией подвижного состава, используемого для грузоперевозок. В частности, внимание уделяется следующим аспектам:

– задержкам в подаче и уборке вагонов: анализ причин и последствий задержек, а также их влияние на общую эффективность грузоперевозок;

– неравномерности движения грузовых поездов: исследование факторов, влияющих на колебания в объемах грузоперевозок и временные рамки операций;

– взаимодействию между участниками транспортного процесса: оценка координации между операторами, владельцами подвижного состава и инфраструктурными организациями;

– экономическим последствиям: оценка экономических потерь, вызванных задержками и неэффективными процессами, а также их влияние на конечных пользователей.

Актуальность обусловлена несколькими ключевыми факторами.

1. Рост объемов грузоперевозок: с увеличением объемов грузоперевозок в мире эффективное использование железнодорожного транспорта становится критически важным для поддержания конкурентоспособности экономики.

2. Оптимизация процессов: выявлены проблемы и разработаны рекомендации, способствующие оптимизации процессов работы железнодорожного транспорта и улучшению взаимодействия между участниками транспортного процесса.

3. Инновации и современные технологии: внедрение новых технологий и методов анализа данных может значительно повысить эффективность работы

железнодорожных путей необщего пользования, что делает исследование особенно актуальным в условиях стремительного развития транспортной отрасли.

Объектом и методами исследования охватываются ключевые аспекты работы железнодорожного транспорта, позволяющие глубже понять существующие проблемы и разработать эффективные решения. Таким образом, данная статья может служить основой для дальнейших исследований и внедрения эффективных решений в области грузоперевозок.

Основная часть

В обязанности подъездных путей необщего пользования входит осуществление разнообразного круга задач по оптимизации деятельности промышленных предприятий и организаций: от процедур приёмосдаточных операций и осмотра вагонов до отдельной весовой проверки вагонов с грузами; также в эту работу входит сортировка подвижного состава по зонам погрузки/выгрузки, его оперативная подача и последующая уборка после выполнения операций [2].

На основе данных Федеральной службы государственной статистики по состоянию на 1 января 2014 г. в России было зафиксировано свыше 18 тыс. единиц, примыкающих к основным путям необщего пользования (ПНОП), с общей длиной более чем в 63,5 тыс. км. Общее число вагонов, обслуживаемых через подачу/уборку и эксплуатацию этих ПНОП, превышает указанные 18 тыс. [3].

Состояние современной системы управления эксплуатацией железнодорожных ПНОП и их интеграции с магистральной инфраструктурой оставляет желать лучшего, что проявляется в резко возросшем времени пребывания вагонов на этих путях. Все чаще происходят случаи вынужденной остановки поездов из-за перегрузки ПНОП и невозможности их своевременного приема, а также увеличивается количество повреждений вагонов в процессе грузовых операций.

В статье В.И. Апатцева рассматривается проблема увеличения простоев вагонов на путях необщего пользования, негативно влияющих на их оборот и снижающих эффективность железнодорожной сети. Основные показатели работы операторских компаний и ОАО «РЖД» – это погрузка, выгрузка, оборот вагона и производительность труда. В 2017 г. средний оборот вагона составил 15,06 сут, из которых только 21,6 % времени вагон находился в движении. Значительная часть времени (31,1 %) была потрачена на технических станциях, а 35,2 % – на путях, отвечающих за отправку и получение грузов. Для улучшения ситуации необходимо наладить взаимодействие между всеми участниками перевозок [10].

В статье Д.Ю. Левина рассматриваются проблемы простоев вагонов на железнодорожном транспорте и необходимость оптимизации процессов подачи и вы-

грузки. Основные сложности связаны с несвоевременной подачей вагонов на грузовые фронты, приводящей к значительным простоям. Это вызвано недостатком местных поездов и сгущением поступления грузов, что не позволяющими полностью использовать выгрузочные возможности. Для повышения эффективности работы диспетчерских центров необходимо анализировать интервалы подачи вагонов, выявлять неполные подачи и оптимизировать маневровые операции, что снизит затраты и улучшит ритмичность грузовых операций [11].

В диссертации А.В. Ермаковой рассматривается резерв времени свободности элемента «горловина», важного для минимизации непроизводительных простоев вагонов на железнодорожной станции. Этот резерв способствует эффективному маневровому обслуживанию путей необщего пользования, снижающему риски сбоев и обеспечивающему бесперебойную подачу и уборку групп вагонов. Эффективное управление резервами времени улучшает ритмичность операций и уменьшает потребность в капитальных затратах на развитие станции [12].

Простой вагонов на железных дорогах России в последние годы стал серьезной проблемой, особенно в 2023 г. В 2022 г. 67 % опрошенных предприятий сталкивались с затруднениями из-за простоя вагонов, а в 2023 г. этот показатель вырос до 87 % [4, 5]. В 2023 г. количество предприятий, столкнувшихся с простоем вагонов, увеличилось на 20 % по сравнению с прошлым годом. Простой вагонов увеличился в 2,5 раза, составив в среднем 43 вагоно-часа [4, 5].

Ключевые причины данной ситуации [4, 5]:

1) несоответствие текущей технологической базы и технического оснащения железнодорожных путей необщего пользования новым рыночным требованиям;

2) изменение форм собственности предприятий-отправителей или получателей грузов, переход к рыночному планированию экономики вместо государственного регулирования;

3) рост доли частного подвижного состава в общем парке вагонов и его увеличение;

4) значительное расширение импортно-экспортных перевозок;

5) расширение номенклатуры грузов, включая их диверсификацию по отправителям.

В связи с вышеизложенным, актуальность проблемы модернизации железнодорожного транспорта промышленных предприятий для адаптации ПНОП к новым условиям работы становится очевидной и требует комплексного решения. Необходимо пересмотреть существующие технологии управления железнодорожных ПНОП, оптимизировать взаимодействие с магистральными линиями, а также обеспечить соответствующее техническое оснащение.

Эксплуатация каждого отдельного ПНОП осуществляется в соответствии с «Инструкцией о порядке обслуживания и организации движения на подъездном пути», а взаимодействие ПНОП с железной дорогой выполняется на основании «Договора об эксплуатации подъездного пути» или «Договора на подачу и уборку вагонов». Также взаимодействие с железной дорогой может регламентироваться «Единым технологическим процессом работы подъездного пути и станции примыкания» (ЕТП).

Для построения модели расчета времени нахождения вагонов на пути необщего пользования необходимо определить целевую функцию, которая будет отражать основные аспекты, влияющие на эффективность использования этих вагонов. В общем случае целевая функция может быть сформулирована как

$$Q = \sum_{i=1}^n (T_i W_i) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где T_i – время нахождения i -го вагона на пути, ч; W_i – коэффициент, отражающий значимость i -го вагона (например, может учитывать приоритетность постановки вагона, тип груза и т.д.); n – общее количество вагонов.

Целевую функцию модели расчета времени простоя вагонов на ПНОП требуется оптимизировать, в общем случае будет иметь вид:

$$Q = f(n, T_{\text{ТГК}}, T_{\text{доп}}), \quad (2)$$

где $T_{\text{ТГК}}$ – суммарное время выполнения технических, грузовых и коммерческих операций, ч; $T_{\text{доп}}$ – дополнительное время нахождения вагонов на пути необщего пользования, ч;

$$T_{\text{доп}} = \sum_{i=1}^k t_{\text{ож}i}^{n/c1} + \sum_{i=1}^n t_{\text{ож}i}^{\text{лок}1} + \sum_{i=1}^m t_{\text{ож}i}^{\text{гр}} + \sum_{i=1}^k t_{\text{ож}i}^{n/c2} + \sum_{i=1}^n t_{\text{ож}i}^{\text{лок}2} + t_{\text{н/д}}, \quad (3)$$

где $\sum_{i=1}^k t_{\text{ож}i}^{n/c1}$ – время ожидания приёмосдаточных операций, зависящее от негативного фактора k , влияющего на подачу вагона на ПНОП, ч; $\sum_{i=1}^n t_{\text{ож}i}^{\text{лок}1}$ – время ожидания локомотива, зависящее от негативного фактора n , влияющего на подачу вагона на ПНОП, ч; $\sum_{i=1}^m t_{\text{ож}i}^{\text{гр}}$ – время ожидания грузовых операций, зависящее от негативного фактора m , влияющего на простой вагона на ПНОП, ч; $\sum_{i=1}^k t_{\text{ож}i}^{n/c2}$ – время ожидания приёмосдаточных операций, зависящее от негативного фактора k , влияющего на уборку вагона с ПНОП, ч; $\sum_{i=1}^n t_{\text{ож}i}^{\text{лок}2}$ – время ожидания локомотива, зависящее от негативного фактора n , влияющего на уборку вагона с ПНОП, ч; $t_{\text{н/д}}$ – дополнительное время простоя вагона, связанное с несогласованностью действий работников, их занятостью или другими человеческими факторами, ч.

В исследовании [8] выдвинута гипотеза о том, что время простоя вагонов зависит от количества вагонов, находящихся у собственников подвижного состава (СПС). Это может означать, что с увеличением числа вагонов у СПС время их простоя также увеличивается, что может быть связано с различными факторами, такими как перегрузка инфраструктуры или недостаточная пропускная способность.

Статья [8] указывает на то, что крупные операторы занимают значительную долю в общем объеме грузоперевозок, что может влиять на общие показатели простоя. 60 % всех СПС имеют количество прибывающих вагонов до 10 [8]. Это может свидетельствовать о том, что небольшие партии грузов чаще всего обрабатываются, что может быть связано с особенностями логистики и управления грузопотоками. Превышение времени простоя у 95 % вагонов с одной операцией указывает на проблемы, связанные с неэффективностью обработки [8]. Высокий коэффициент неравномерности прибытия грузов (4.13) также может указывать на сложности в планировании и управлении грузопотоками.

Проведенное исследование зависимости времени простоя вагонов от количества вагонов у СПС выявляет ряд критически важных аспектов, влияющих на эффективность грузоперевозок. Полученные данные подчеркивают, что увеличение числа вагонов у СПС может приводить к росту времени простоя, что в свою очередь негативно сказывается на общей операционной эффективности.

Результаты

В ходе анализа работ рассматривались возможные причины простоев вагонов на железнодорожных путях необщего пользования. На рис. 2 представлена классификация возможных причин простоя вагонов в ожидании подачи/уборки.

Диаграмма Исикавы представляет собой один из методов поиска и визуализации причин, которые приводят к проблемам, вызывающим задержки в движении грузовых вагонов.

В табл. 1 представлен ABC-анализ причин простоя вагонов, указанных на рис. 2.

Таким образом, наибольшее влияние на простой вагонов оказывают первые 5 элементов таблицы, их устранение имеет первоочередную значимость и может быть произведено с помощью следующих решений.

1. Оптимизация логистических процессов:

- планирование и прогнозирование: использование современных систем управления, основанных на данных, для прогнозирования потребностей в подаче/уборке вагонов;
- интеграция цепей поставок: установление тесного взаимодействия между всеми участниками логистической цепи.

2. Анализ и оптимизация расписания:

- эффективное расписание движения: разработка более гибкого и адаптивного расписания, которое учитывает изменения в спросе и может быстро реагировать на непредвиденные обстоятельства;
- использование алгоритмов оптимизации: применение математических моделей и алгоритмов для оптимизации маршрутов и расписаний.



Рис. 2. Диаграмма причин простоя вагонов на железнодорожных путях необщего пользования

ABC-анализ причин простоя вагонов

Элемент простоя вагонов	Оценка вероятности возникновения элемента, от 1 до 10	Оценка влияния элемента на простой, от 1 до 10	Вероятность возникновения элемента, %	Влияние элемента на простой, %	Кумулятивный удельный вес	Группа
1. Нехватка подвижного состава	4	10	7,41	12,99	12,99	А
2. Ожидание погрузки/выгрузки	10	9	18,52	11,69	24,68	А
3. Задержки в грузоперевозках	3	8	5,56	10,39	35,06	А
4. Сезонные колебания в спросе	5	7	9,26	9,09	44,16	А
5. Непредвиденные технические инциденты	1	6	1,85	7,79	51,95	А
6. Экономический кризис	2	5	3,70	6,49	58,44	В
7. Неисправности оборудования/ подвижного состава	2	5	3,70	6,49	64,94	В
8. Ошибки персонала	3	5	5,56	6,49	71,43	В
9. Недостаточный информационный обмен	3	5	5,56	6,49	77,92	В
10. Изменения в тарифах	7	4	12,96	5,19	83,12	В
11. Инфраструктурные проблемы	4	4	7,41	5,19	88,31	С
12. Правительственные регуляции	1	3	1,85	3,90	92,21	С
13. Забастовки работников	2	3	3,70	3,90	96,10	С
14. Плановое обслуживание	1	2	1,85	2,60	98,70	С
15. Погодные условия	6	1	11,11	1,30	100,00	С
16. Сумма	54	77	100,00	100,00		

Элементы, относящиеся к группе В, составляют 30 % от всех элементов и оказывают 20 % влияния на простой вагонов. Их можно устранить с помощью следующих решений.

1. Обучение и повышение квалификации персонала:

– обучение операторов и логистов: проведение тренингов и семинаров для сотрудников, занимающихся управлением грузовыми перевозками;

– создание команд быстрого реагирования: формирование специализированных команд, способных быстро реагировать на возникшие проблемы с вагонами и устранять их.

2. Стимулирование сотрудничества:

– поощрение сотрудничества между различными транспортными компаниями и грузоотправителями для обмена ресурсами и информацией;

– формирование кластеров транспортных и логистических компаний для совместного решения проблем и оптимизации процессов.

Категория «С» элементов составляет всего 5 % от общего числа причин. Их устранение не так необходимо, по сравнению с элементами других категорий, но они также могут быть устранены с помощью следующих решений.

1. Внедрение современных технологий.

– автоматизация процессов: использование автоматизированных систем для управления движением вагонов;

– системы мониторинга и трекинга: внедрение технологий GPS и RFID для отслеживания местоположения вагонов в реальном времени.

2. Улучшение технического обслуживания:

– профилактическое обслуживание: регулярное техническое обслуживание подвижного состава;

– модернизация инфраструктуры: инвестиции в модернизацию железнодорожной инфраструктуры, включая пути и станции.

Эти решения могут значительно сократить время простоя вагонов, повысить общую эффективность грузоперевозок и снизить экономические потери, связанные с неэффективным использованием подвижного состава.

Выводы

Устранение причин простоя вагонов на железнодорожном транспорте является критически важной задачей, влияющей на общую эффективность логистических операций и экономику перевозок. В результате проведенного анализа можно выделить несколько решений (табл. 2).

Таким образом, успешное устранение проблем требует комплексного подхода, включающего в себя оптимизацию процессов, внедрение технологий, обучение персонала и укрепление сотрудничества между участниками логистических цепей. Эти меры не только повысят эффективность работы железнодорожного транспорта, но и внесут значительный вклад в развитие экономики в целом.

Варианты решения основных проблем простоя вагонов на ПНОП

Проблема	Решение
1. Задержка подачи/уборки вагонов клиентам из-за неравномерности размеров движения грузовых поездов Колебания погрузки и выгрузки на транспортных предприятиях вследствие сезонного спроса	1. Разработка более точных графиков движения поездов, учитывающих пики и спады в их прибытии 2. Модернизация технических средств на ПНОП для повышения их пропускной способности
2. Несогласование клиентами вагонов на подачу/уборку	1. Использование современных информационных систем автоматизации передачи информации 2. Регулярный анализ причин несогласований и разработка мероприятий по их устранению
3. Нарушение клиентом правил ТУ, МТУ, НТУ	1. Введение повышенных штрафов клиентам за несоблюдение установленных правил 2. Проведение регулярных обучающих семинаров для клиентов по требованиям ТУ, МТУ и НТУ
4. Ожидание накопления необходимого количества вагонов для подачи/уборки либо погрузки/выгрузки	1. Внедрение автоматизированных систем для обозначения статуса вагонов и их местонахождения на станции 2. Проведение тренингов для специалистов по эффективному управлению процессами накопления
5. Задержка вагонов на фронтах предприятий в связи с проблемами клиента в обеспечении грузовых операций	1. Обновление или увеличение количества погрузочно-разгрузочных средств для ускорения операций 2. Контроль запасов сырья
6. Задержка подачи и уборки вагонов по причине приоритетности обслуживания клиентов в связи с большим количеством примыкающих железнодорожных путей необщего пользования и непосильной задачей обслуживания всех разом	1. Создание посуточной приоритетности обслуживания ПНОП 2. Увеличение количества маневровых средств на станциях, обслуживающих большое количество ПНОП
7. Другие непредвиденные обстоятельства, имеющие более значимое значение в стабильной работе станции, повлиявшие на подачу/уборку вагонов на грузовые фронты предприятий	Регулярное обучение персонала по вопросам безопасности и оперативного реагирования на непредвиденные ситуации

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Псеровская Е.Д., Зачешигрива М.А., Чуйкова О.Ю. Организация грузовой и коммерческой работы станции и примыкающих железнодорожных путей необщего пользования : учебно-методическое пособие. Новосибирск : СГУПС, 2019. 98 с. URL : <https://e.lanbook.com/book/164598> (дата обращения: 11.04.2025).
2. Вернигора Р.В. Проблемы функционирования железнодорожных подъездных путей Украины в современных условиях // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 4, № 3(58). С. 64–68. – EDN: QBWTSN.
3. Стратегия инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г.» (Белая книга ОАО «РЖД») // СПС «КонсультантПлюс». URL : <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=EXP;n=547322> (дата обращения: 11.04.2025).
4. РЖД-Партнер. URL : <https://www.rzd-partner.ru/kolonka-eksperta/problema-prostoya-vagonov-trebuetsya-kompleksnogo-resheniya/> (дата обращения: 10.04.2025).
5. Логистика в России : офиц. сайт LOGIRUS. URL : https://logirus.ru/news/transport/prostoy_vagonov_v_2023_godu_uvelichilsya_v_2-5_raza.html (дата обращения: 10.04.2025).
6. О железнодорожном транспорте в Российской Федерации : федеральный закон от 10.01.2003 г. № 17-ФЗ (послед. ред). URL : https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40443/ (дата обращения: 10.04.2025).
7. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. : утв. распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-п) // Гарант.ру 2008. URL : <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/93585/> (дата обращения: 10.04.2025).
8. Золотарев С.А. Необходимость изучения законов распределения оборота вагона на путях необщего пользования // Сборник научных трудов SWorld. 2013. Т. 2, № 4. С. 8–13. EDN: PZETLV.
9. Типовой технологический процесс работы грузовой. Москва : Транспорт, 1992. 216 с.
10. Апатцев В.И., Эрлих Н.В., Эрлих А.В. Обслуживание путей необщего пользования на основе графика собственного поездного формирования // Наука и техника транспорта. 2019. № 1. С. 63–70. EDN: ZAGFRL.
11. Левин Д.Ю. Адаптация организации местной работы к современным условиям // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2018. № 77(1). С. 18–26. URL : <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-1-18-26> (дата обращения: 10.04.2025).
12. Ермакова А.В. Выбор технологически эффективных периодов маневрового обслуживания путей необщего пользования: специальность 29.40.00 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ермакова Анна Владимировна, 2022. 229 с. EDN: YWREGF.

REFERENCES

1. Pserovskaya E.D., Zacheshigriva M.A., Chuikova O.Yu. Organizatsiya gruzovoj i kommercheskoj raboty stantsii i primykayushchih zheleznodorozhnyh putej neobshchego pol'zovaniya [Organization of freight and commercial work of the station and adjacent railway tracks of non-public use] : uchebno-metodicheskoe posobie. Novosibirsk : SGUPS, 2019. 98 s. URL : <https://e.lanbook.com/book/164598> (data obrashcheniya: 11.04.2025).
2. Vernygora R.V. Problemy funktsionirovaniya zheleznodorozhnyh pod'ezdnyh putej Ukrainy v sovremennykh usloviyakh [Problems of functioning of railroad access roads of Ukraine in modern conditions // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tehnologij. 2012. T. 4, № 3(58). S. 64–68. EDN QBWTSN
3. Strategiya innovatsionnogo razvitiya OAO «Rossijskie zheleznye dorogi na period do 2015 g.» (Belaya kniga OAO «RZhD» [Strategy of Innovative Development of JSC “Russian Railways” for the period up to 2015 (White Book of JSC «Russian Railways»)] // SPS «Konsul'tantPlis». URL : <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=EXP;n=547322> (data obrashcheniya: 11.04.2025).
4. Zhurnal «RZhD-Partner» [«RZhD-Partner Journal»]. URL : <https://www.rzd-partner.ru/kolonka-eksperta/problema-prostoya-vagonov-trebuem-kompleksnogo-resheniya/> (data obrashcheniya: 10.04.2025).
5. Logistika v Rossii [Logistics in Russia] : office. sait LOGIRUS. URL : https://logirus.ru/news/transport/prostoy_vagonov_v_2023_godu_uvelichilsya_v_2-5_raza.html (data obrashcheniya: 10.04.2025).
6. O zheleznodorozhnom transporte v Rossijskoj Federatsii : federal'ny zakon ot 10.01.2003 g. № 17-FZ (poslednyaya redaktsiya) [Federal Law «On Railway Transport in the Russian Federation» dated 10.01.2003 № 17-FZ (latest edition). URL : https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40443/ (data obrashcheniya: 10.04.2025).
7. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federatsii do 2030 g. [Strategy of Railway Transport Development in the Russian Federation until 2030] : utv. rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 17 iyunya 2008 g. № 877-r // Garant.ru. 2008. URL : <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/93585/> (data obrashcheniya: 10.04.2025).
8. Zolotarev S.A. Neobhodimost' izucheniya zakonov raspredeleniya oborota vagona na putyah neobshchego pol'zovaniya [Necessity of studying the laws of the distribution of the car turnover on the tracks of non-public use] // Sbornik nauchnykh trudov SWorld. 2013. T. 2, № 4. S. 8–13. EDN: PZETLV.
9. Tipovoj tehnologicheskij protsess raboty gruzovoj [Typical technological process of cargo station]. Moskva : Transport, 1992. 216 s.
10. Apattsev V.I., Erlich N.V., Erlich A.V. Obsluzhivanie putej neobshchego pol'zovaniya na osnove grafika sobstvennogo poyezdno formirovaniya [Maintenance of non-use tracks based on the schedule of own train formation] // Nauka i tehnika transporta. 2019. № 1. S. 63–70. EDN: ZAGFRL.
11. Levin D.Yu. Adaptatsiya organizatsii mestnoj raboty k sovremennym usloviyam [Adaptation of local work organization to modern conditions] // Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. 2018. №77(1). S. 18–26. URL : <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-1-18-26> (data obrashcheniya: 10.04.2025).
12. Ermakova A.V. Vybor tehnologicheski effektivnykh periodov manevrovogo obsluzhivaniya putej neobshchego pol'zovaniya: [Choice of technologically effective periods of shunting maintenance of non-public use tracks]: spetsial'nost' 29.40.00 : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehnikeskikh nauk / Ermakova Anna Vladimirovna, 2022. 229 s. EDN: YWREGF.

Информация об авторах

Д.Ю. Гришкова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»;
Д.М. Молодин – аспирант кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав».

Information about the authors

D.Y. Grishkova – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Logistics, Commercial Work and Rolling Stock;

D.M. Molodin – Post-graduate Student, Department of Logistics, Commercial Work and Rolling Stock.

Статья поступила в редакцию 16.12.2024; одобрена после рецензирования 04.02.2025; принята к публикации 28.03.2025.
The article was submitted: 16.12.2024; approved after reviewing: 04.02.2025; accepted for publication: 28.03.2025.

Научная статья
УДК 624.139 (571.6)
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-31-35

ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО СЕВЕРА

Жданова Светлана Мирзахановна¹, Нератова Оксана Анатольевна²,
Парамонова Ирина Евгеньевна³

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

¹ mirzahanovna@mail.ru

² oksiplus@mail.ru

³ ira.paramonova.2000@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются актуальные проблемы эксплуатации земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах Дальневосточного Севера, приводятся основные причины возникновения деформаций. Очевидно, что сооружение земляного полотна нарушает естественный теплообмен между атмосферой и грунтовым массивом. Температурные колебания как на поверхности, так и в грунтовой толще сопровождаются изменениями механических свойств и температуры мерзлых пород. Приведены данные, подтверждающие факт повышения температуры грунтов в основании и теле земляного полотна в многолетнем цикле эксплуатации.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, земляное полотно, повышение температуры, деформации, техногенное воздействие

Original article

PROBLEMS OF ROADBED OPERATION ON PERMAFROST SOILS IN THE FAR EASTERN NORTH

Zhdanova Svetlana M.¹, Neratova Oksana A.², Paramonova Irina E.³

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

¹ mirzahanovna@mail.ru

² oksiplus@mail.ru

³ ira.paramonova.2000@mail.ru

Abstract. The article deals with the urgent problems of earth bed operation on permafrost soils of the Far East North, the main causes of deformations are given. It is obvious that the construction of the earth bed breaks the natural heat exchange between the atmosphere and the soil massif. Temperature fluctuations both on the surface and in the ground mass are accompanied by changes in mechanical properties and temperature of frozen rocks. The data confirming the fact of soil temperature increase in the base and body of the earth bed in a multi-year operation cycle are presented.

Keywords: permafrost, roadbed, temperature increase, deformations, anthropogenic impact

Введение

Для освоения растущих грузоперевозок железных дорог Дальнего Востока требуется комплексное обновление их инфраструктуры, реконструкция и модернизация, строительство вторых путей и двухпутных вставок. Кроме того, в соответствии с утвержденной Правительством Российской Федерации стратегией, к 2030 г. на Дальнем Востоке необходимо построить 20 тыс. км новых железных дорог [1].

Верхняя зона литосферы в регионах многолетнемерзлых грунтов подвержена воздействию различных природных и техногенных факторов, влияющих на ее температурный режим, глубину и характер сезонного промерзания грунтов.

Значительная деформативность земляного полотна на слабых при протаивании многолетнемерзлых грунтах связана, в первую очередь, с суровыми природно-климатическими условиями и, во-вторых, с техногенным воздействием подвижного состава. Деформативность земляного полотна Восточного полигона, начиная с 80-х гг. прошлого столетия, составляет более 30 %, на некоторых перегонах – до 40 % [2].

Восточный полигон эксплуатируется в южной области многолетнемерзлых грунтов, в зоне высоко-температурной мерзлоты. Мерзлые толщи земной коры находятся в непрерывном энергетическом и вещественном обмене с окружающей внешней средой и глубинными слоями земной коры. Поэтому, как

PROBLEMS OF ROADBED OPERATION ON PERMAFROST SOILS
IN THE FAR EASTERN NORTH

показала практика эксплуатации земляного полотна, I принцип (сохранение грунтов в мерзлом состоянии) малоэффективен, а II принцип (в протаявшем состоянии) – с малыми деформациями, без дополнительных мер практически невозможен.

Температурные колебания как на поверхности, так и в грунтовой толще сопровождаются изменениями механических свойств и температуры мерзлых пород. Как показывают режимные наблюдения за температурой в скважинах, установленных в различные годы в земляном полотне и прилегаю-

щей территории Восточного полигона, активная зона в основании земляного полотна значительно увеличилась: от 5–6 до 8–9 м. В подтверждение приведены графики изменения температур в многолетнем цикле в скважине, находящейся в приподошвенной зоне земляного полотна на участке Тынды–Ургал Дальневосточной железной дороги (рис. 1). Они подтверждают факт повышения температуры, полученный также от метеостанций, расположенных на территории Восточного полигона, за последние 40 лет в зоне многолетнемерзлых грунтов.

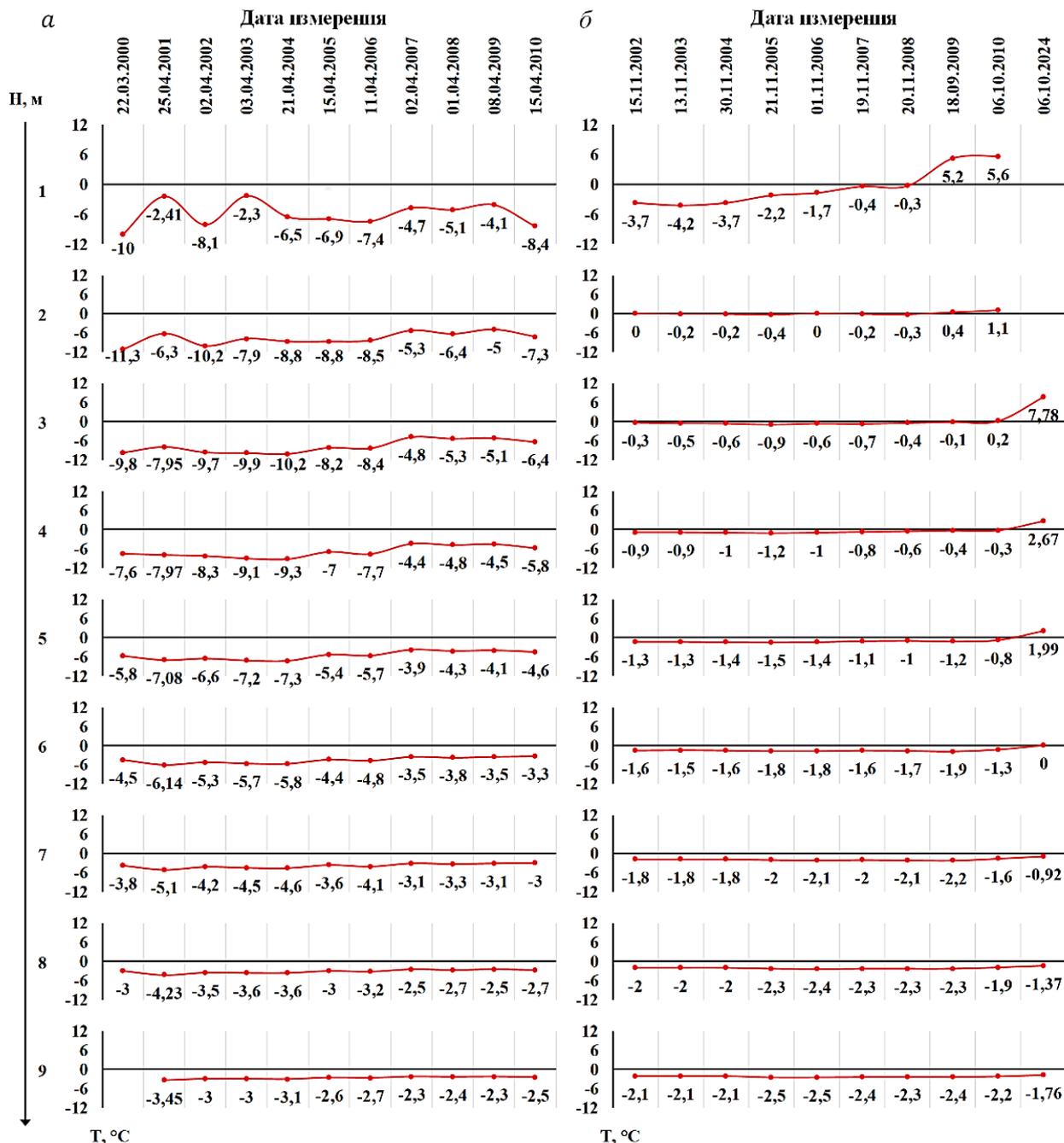


Рис. 1. Графики изменения температур в скважине 2 (КМ 2378 ПК3+85) за период с 2000 по 2024 г.: а – данные за май–апрель; б – данные за сентябрь–ноябрь

Данные рис. 1, а указывают на тенденцию повышения температуры за рассматриваемый период. Повышение температуры в апреле в период с 2001 г. по 2010 г. на глубине 6 м составляет 2,84 °С. С увеличением глубины величина положительного температурного градиента уменьшается: на 7 м – 2,1 °С, на 8 м – 1,53 °С, на 9 м – 0,95 °С. Понижение нулевой изотермы по глубине за 14 лет (с октября 2010 г. по октябрь 2024 г.) составила 2,6 м (рис. 1, б). На глубине 3 м в скважине в подошве насыпи за период с октября 2010 г. по октябрь 2014 г. положительный температурный градиент составил 7,58 °С, а на глубине 9 м температура повысилась на 0,44 °С.

Сооружение насыпи нарушает естественный теплообмен между атмосферой и грунтовым массивом. Кроме того, насыпь сама является препятствием и изменяет естественные условия стока поверхностных и грунтовых вод.

При этом:

- в зоне сезонного оттаивания-промерзания уплотнение торфяного слоя приводит к резкому уменьшению степени конденсации и испарения влаги;

- происходит изменение консистенции грунтов и увеличение пластических деформаций, что влияет на стабильность земляного полотна из-за потери его устойчивости.

На рис. 2 представлены ежегодные графики температур в скважине.

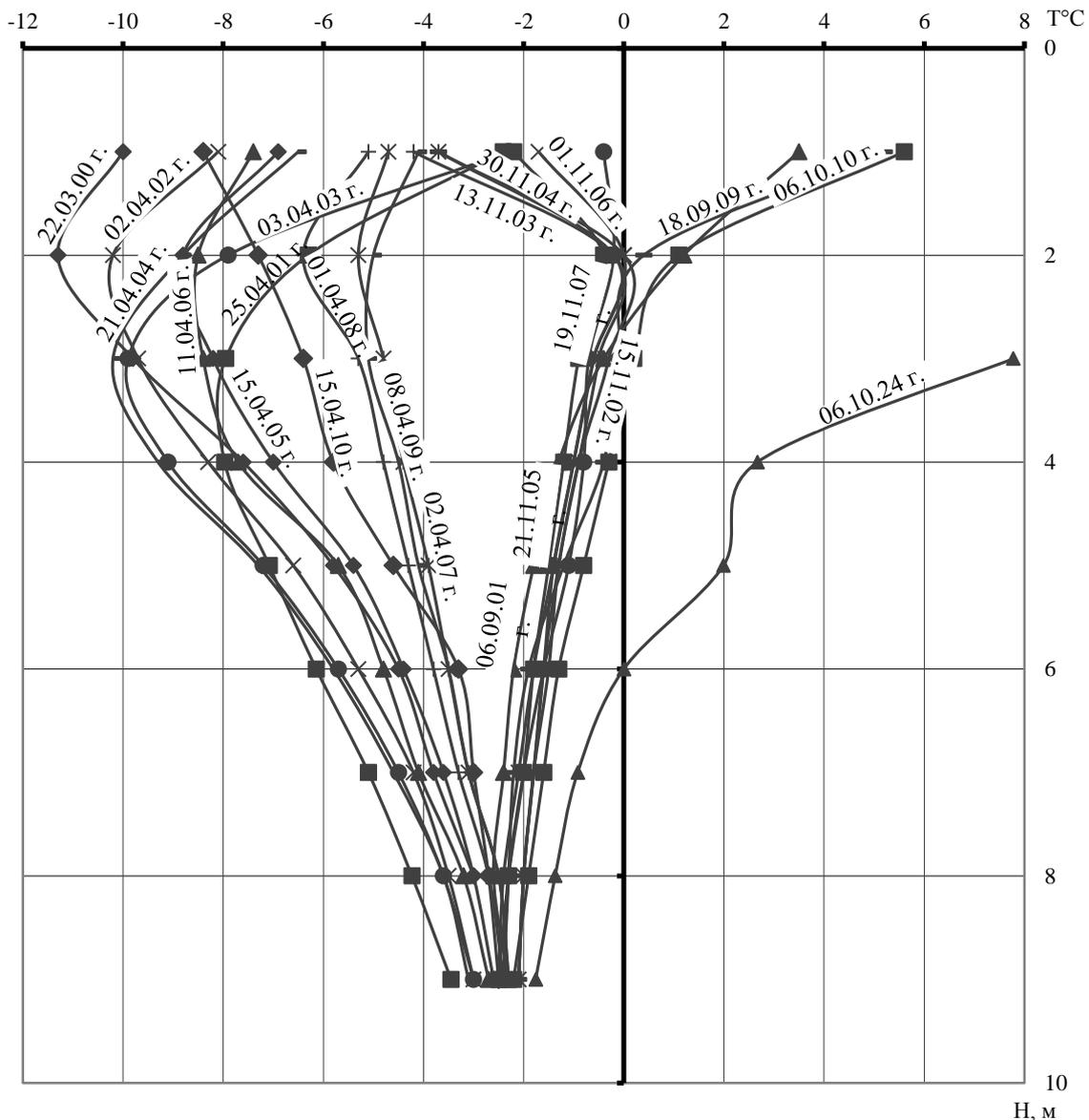


Рис. 2. Значение температур грунтов в скважине 2 км 2378 пк 3+85 в многолетнем цикле

Все вышеперечисленные процессы влияют на искажение продольного профиля и плана линии. Несмотря на совокупность перечисленных факторов, геотехническая система «земляное полотно–основание» постепенно стремится восстановить свое термодинамическое равновесие [3].

Многолетние режимные наблюдения [4] показали, что данный процесс сопровождается постепенным протаиванием слабых грунтов основания. При этом термодинамическое равновесие в основании насыпей, например, в районе Ургала наступает на глубине около 7 м от поверхности основной площадки. В указанной зоне резко меняется характер грунтовых процессов: «тепловые» осадки переходят в пластические деформации. При этом процентное содержание деформирующихся мест не уменьшается, а, чаще всего, одни виды деформаций переходят в другие. Так, например, при нарушении работы водоотводов возникает напорная механическая суффозия, иногда образуются гидрораколлиты (ледяные бугры в теле земляного полотна).

Таким образом, деформативность земляного полотна зависит от воздействия целого комплекса факторов: природно-климатических, вибродинамических нагрузок, сложных геологических, гидрогеологических, мерзлотно-грунтовых условий, переувлажнения грунтов основания, что приводит к снижению их несущей способности, возникновению криогенных процессов. Кроме того, циклическое промерзание-оттаивание грунтов активной зоны, а также реологические процессы в грунтах земляного полотна способствуют потере стабильности геотехнической системы «земляное полотно–основание».

Современные нормативные документы по содержанию земляного полотна и искусственных сооружений в южной зоне вечной мерзлоты требуют их пересмотра, поскольку они направлены преимущественно на ликвидацию последствий процессов, происходящих в геотехнической системе «земляное полотно–основание», а не на их причины, что в первую очередь требует целенаправленного подхода к проблеме для эффективной эксплуатации транспортной инфраструктуры [5, 6].

Методы стабилизации земляного полотна должны способствовать природным естественным восстановительным процессам [7].

При этом необходимо:

- обеспечивать отвод поверхностных и грунтовых напорных вод;
- предотвращать криогенные деформации, возникающие в результате сезонного промерзания грунтов;
- устранять пластические деформации.

Таким образом, комплексные методы стабилизации оснований должны включать, в первую очередь:

- повышение функциональных возможностей водопропускных сооружений при отводе поверхностных и грунтовых вод;
- нормализацию температурного режима грунтов основания с помощью различных конструктивно-технологических решений;
- способствовать обеспечению стабильности земляного полотна в процессе сезонного промерзания–протаивания грунтов деятельного слоя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р // Правительство России : офиц. сайт. URL : <http://static.government.ru/media/files/DkdcT7dHs4fGLrhkK5lk0egvr4rA2QZi.pdf> (дата обращения: 20.02.2025).
2. К вопросу об актуальных задачах при решении проблем Восточного полигона ДВЖД / С.М. Жданова, О.А. Нератова, А.Р. Едигарян [и др.] // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2022. № 3(32). С. 10–18. EDN: LEXHWP.
3. Жданова С.М., Пиотрович А.А. Научно-практические результаты для проектирования земляного полотна на мерзлоте // Транспорт Урала. 2014. № 1(40). С. 22–25. EDN: RYMATH.
4. Дыдышко П.И. Деформации земляного полотна железнодорожного пути и их устранение в условиях вечной мерзлоты // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 4. С. 43–57. EDN: ZGWJCF. doi:10.21782/KZ1560-7496-2017-4(43-57)
5. СП 447.1325800.2019. Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования: нормативно-технический материал. Москва, 2019. 51 с.
6. Инструкция по содержанию земляного полотна железнодорожного пути на участке Хани – Тында – Комсомольск-на-Амуре – Советская Гавань Дальневосточной железной дороги : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30.12.2015 г. № 3162р.
7. Жданова С.М., Пиотрович А.А. Основы проектирования конструктивно-технологических решений для строительства, реконструкции и усиления линейных объектов в суровых условия : учебное пособие. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2017. 122 с.

REFERENCES

1. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federatsii do 2030 g. [Strategy of Railway Transport Development in the Russian Federation until 2030] : utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii ot 17 iyunya 2008 g. № 877-r // Pravitel'stvo Rossii : official'nyj sait. URL : <http://static.government.ru/media/files/DkdcT7dHs4fGLrhkK5lk0egvr4rA2QZi.pdf> (data obrashcheniya: 20.02.2025).
2. K voprosu ob aktual'nyh zadachah pri reshenii problem Vostochnogo poligona DVZhD [To the question about the actual tasks in solving the problems of the Eastern polygon of the Far Eastern Railway] / S.M. Zhdanova, O.A. Neratova, A.R. Yedigaryan [et al.] // Transport Aziatsko-Tihookeanskogo regiona. 2022. № 3(32). S. 10–18. EDN: LEXHWP.

3. Zhdanova S.M., Piotrovich A.A. Nauchno-prakticheskie resul'taty dlya proektirovaniya zemlyanogo polotna na merzlye [Scientific and practical results for the design of earth bed on permafrost] // Transport Urala. 2014. № 1(40). S. 22–25. EDN: RYMATH.
4. Dydysenko P.I. Deformatsii zemlyanogo polotna zheleznodorozhnogo puti i ih ustraneniye v usloviyah vechnoj merzloty [Deformations of the railway track subgrade and their elimination in permafrost conditions] // Kriosfera Zemli. 2017. T. 21. № 4. S. 43–57. EDN: ZGWJCF. doi:10.21782/KZ1560-7496-2017-4(43-57)
5. SP 447.1325800.2019. Zheleznye dorogi v rajonah vechnoj merzloty. Osnovnye polozheniya proektirovaniya [SP 447.1325800.2019. Railways in permafrost areas. Basic provisions of design]: normativno-tehnicheskij material. Moscow, 2019. 51 s.
6. Instruksiya po sodержaniyu zemlyanogo polotna zheleznodorozhnogo puti na uchastke Khani – Tynda – Komsomolsk-on-Amurė – Sovetskaya Gavan Dal'nevostochnoj zheleznoj dorogi [Instruction on the maintenance of the railway track subgrade on the section Khani – Tynda – Komsomolsk-on-Amurė – Sovetskaya Gavan of the Far Eastern Railway] : utv. rasporyazheniem OAO «RZhD» ot 30.12.2015 № 3162r.
7. Zhdanova S.M., Piotrovich A.A. Osnovy proektirovaniya konstruktivno-tehnologicheskikh reshenij dlya stroitel'stva, rekonstruktsii i usilenij linejnykh ob'ektov v surovyykh usloviyah [Fundamentals of design of structural and technological solutions for construction, reconstruction and reinforcement of linear objects in harsh conditions]: uchebnoe posobie. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2017. 122 s.

Информация об авторах

С.М. Жданова – доктор технических наук, заведующий НИЛ «Основания и фундаменты»;
О.А. Нератова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство»;
И.Е. Парамонова – студент.

Information about the authors

S.M. Zhdanova – Doctor of Sciences (Engineering), Head of Bases and Foundations Research Laboratory;
O.A. Neratova – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Construction Department;
I.E. Paramonova – Student.

Статья поступила в редакцию 20.02.2025; одобрена после рецензирования 02.04.2025; принята к публикации 02.04.2025.
The article was submitted: 28.03.2025; approved after reviewing: 02.04.2025; accepted for publication: 02.04.2025.

Научная статья
УДК 620. 92
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-36-46

АВТОНОМНАЯ ГИБРИДНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Исса Хайдер Абдулсахиб Исса¹, Велькин Владимир Иванович², Абдали Лаит Мохаммед Абдали³,
Кувшинов Владимир Владиславович⁴, Муровский Сергей Петрович⁵

^{1,2} Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия
³ Университет Куфы, Президентский университет Куфы, Наджаф, Ирак
⁴ Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия
⁵ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия
¹ hayderissal0@gmail.com
² v.i.velkin@urfu.ru
³ layth_2210@mail.ru
⁴ kuvshinov.vladimir@gmail.com
⁵ murovski@inbox.ru

Аннотация. Рассмотрен подход к определению компонентов автономной гибридной системы с фотоэлектрическими (PV) солнечными панелями, водородной подсистемой и аккумулятором. Аккумулятор и водородная подсистема, состоящая из топливного элемента (ТЭ), электролизера и резервуара для хранения водорода, действуют как система хранения и резервирования энергии. С целью определения необходимой мощности каждого компонента системы для эффективного соответствия нагрузке, необходимой при получении наилучших технических и экономических результатов работы автономной гибридной системы, использовалась компьютерная программа в коде MATLAB. Гибридная система и её результаты смоделированы и представлены с использованием среды Matlab/Simulink.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи, топливный элемент, электролизер, система управления питанием, водородный бак

Original article

AUTONOMOUS HYBRID ENERGY SYSTEM BASED ON SOLAR CONVERTERS AND HYDROGEN FUEL CELLS

Issa Hayder A.¹, Velkin Vladimir I.², Abdali Layth M.³, Kuvshinov Vladimir V.⁴, Murovsky Sergey P.⁵

^{1,2} Ural Federal University, Yekaterinbur, Russia
³ University of Kufa, Presidency University of Kufa, Najaf, Iraq
⁴ Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia
⁵ Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia
¹ hayderissal0@gmail.com
² v.i.velkin@urfu.ru
³ layth_2210@mail.ru
⁴ kuvshinov.vladimir@gmail.com
⁵ murovski@inbox.ru

Abstract. An approach to defining the components of a stand-alone hybrid system with photovoltaic (PV) solar panels, a hydrogen subsystem, and a battery is considered. The battery and hydrogen subsystem, consisting of a fuel cell (FC), an electrolyzer, and a hydrogen storage tank, act as an energy storage and backup system. A computer program in MATLAB code was used to determine the required power of each system component in order to effectively match the load required to obtain the best technical and economic results for the hybrid system. The hybrid system was modeled and the results are presented using the Matlab/Simulink environment.

Keywords: photovoltaic converters, fuel cell, electrolyzer, power management system, hydrogen tank

Введение

Моделирование гибридных систем на основе возобновляемой энергии, включающих солнечные батареи (PV), топливные элементы (ТЭ) и аккумуляторные батареи (PV/ТЭ/Системы хранения энергии), является важнейшим аспектом понимания

и оптимизации производительности этих систем. В связи с растущим интересом к использованию возобновляемых источников энергии и необходимостью устойчивого и надежного производства электроэнергии, такие гибридные системы привлекли значительное внимание авторов. Интегра-

ция солнечных батарей, топливных элементов и системы хранения энергии (СХЭ) позволяет более эффективно и надежно использовать возобновляемую энергию. Солнечные батареи генерируют электричество из солнечного излучения, а ТЭ преобразуют химическую энергию в электрическую. Системы хранения энергии играют жизненно важную роль в накоплении и хранении избыточной энергии для последующего использования, обеспечивая непрерывное электроснабжение. Моделирование и симуляция таких гибридных систем включает в себя сложные взаимодействия между различными компонентами, такими как солнечные батареи, ТЭ и СХЭ, а также учет факторов солнечного излучения, температуры, требуемой нагрузки, эффективности системы и стратегии управления. Разрабатывая точные модели и симуляции, исследователи могут анализировать производительность гибридных PV/ТЭ/СХЭ систем в различных условиях эксплуатации и оптимизировать их конструкцию и работу. Кроме того, моделирование и симуляция позволяют исследовать различные стратегии и методы управления энергопотреблением для повышения производительности системы. Эти методы дают возможность оценить различные сценарии, такие как подключение к централизованной сети или автономная работа, оптимальные параметры компонентов и влияние различных возобновляемых источников энергии, интегрированных в схему [1].

В данной работе для исследования предлагается небольшая автономная гибридная система мощностью 5 кВт с целью электроснабжения потребителей жилого дома в городе Насирия Республика Ирак на основе солнечных батарей мощностью 340 Вт каждая, топливных элементов суммарной мощностью 6 кВт, системы кратковременного хранения, представленной 20 аккумуляторными батареями (АК) емкостью 100 А·ч каждая, долгосрочная система хранения, представленная резервуаром для хранения водорода, произведенным электролизером мощностью 10 кВт, использующим избыточную энергию солнечных батарей.

Цель исследования – проектирование гибридной энергосистемы с использованием солнечных батарей, аккумуляторов, топливных элементов и электролизера для снабжения потребителей электроэнергией в течение всего дня и в различных погодных условиях.

Задача исследования – проведение анализа процесса перетока энергии между компонентами системы согласно применяемой в модели управления гибридной системой с целью проверки оптимального режима работы всех ее компонентов.

Методы исследования. Подходящая модель управления разработана путем проектирования гибридной системы с использованием среды Matlab/Simulink и протестирована в условиях средних и высоких температур.

Постановка задачи. В проведенном исследовании рассматривается система управления питанием (PMS), которая гарантирует непрерывный заряд аккумуля

мулятора с максимально заявленной скоростью. Метод управления смягчает переходные изменения фотоэлектрической энергии и мощности нагрузки за счет использования накопителя энергии, что приводит к предотвращению негативной работы подсистемы генерации водорода [2]. Это устраняет необходимость сброса части нагрузки в системе за счет согласования потребляемой мощности от двух источников (фотоэлектрического и ТЭ) с потребностями нагрузки и электролизера. Преимущество ТЭ также заключается в том, что он постепенно подает питание на нагрузку, чтобы защитить ее от внезапных скачков, и таким образом продлевает срок службы самого топливного элемента. Результаты моделирования показывают распределение мощности между источниками, нагрузками и АК при типичном сценарии ежедневной нагрузки и переменных погодных условиях. В работе основное внимание уделялось стратегии управления, поэтому моделирование воздушных и водородных компрессоров не рассматривалось [3, 4].

Материалы, использованные в исследовании

Моделирование фотоэлектрической системы. Простейший фотоэлектрический элемент представлен на рис. 1.

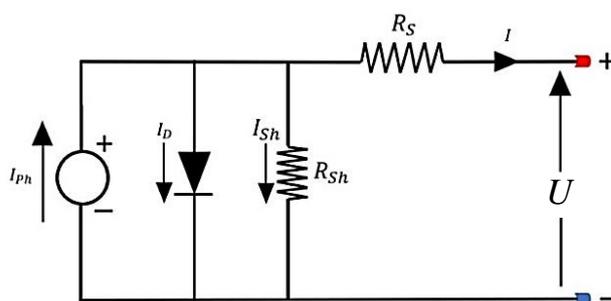


Рис. 1. Фотоэлектрический элемент (модель с одним диодом)

Модель с одним диодом демонстрирует работу фотоэлектрической панели одного диода, подключенного параллельно с источником тока и резистором, соединенными последовательно. Уравнение выходного тока фотоэлектрической панели можно представить следующим образом:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{(U + IR)R_S}{nUT} \right) - 1 \right] - \frac{(U + IR)R_S}{R_L}, \quad (1)$$

где I – выходной ток; I_L – фототок; I_0 – обратный ток насыщения; U – выходное напряжение; IR – обратный ток диода; R_S – последовательное сопротивление; n – коэффициент идеальности диода; UT – тепловое напряжение; R_L – сопротивление нагрузки [6].

Модель с пятью параметрами расширяет модель с одним диодом, рассматривая дополнительные параметры для учета более сложного поведения фотоэлектрической панели. Уравнение выходного тока фотоэлектрической панели в этой модели можно представить как

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{(U + IR_{S_1})}{nUT} \right) - 1 \right] - \frac{(U + IR_{S_1})}{R_L} - a(T - T_{ref}), \quad (2)$$

где a – температурный коэффициент выходного тока; T – рабочая температура; T_{ref} – эталонная температура [7].

Эти уравнения, наряду с другими параметрами и переменными, специфичными для фотоэлектрической панели и моделируемой системы, используются в Simulink для создания математического представления поведения фотоэлектрической системы. Характеристики солнечной панели, использованной в работе представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики солнечного элемента, использованного в работе

Параметры	Единицы измерения
Номинальная мощность	340 Вт
Напряжение при максимальной мощности U_{mp}	37,8 В
Ток при максимальной мощности I_{mp}	9 А
Напряжение разомкнутой цепи U_{oc}	44,5 В
Ток короткого замыкания I_{sc}	9,57А
Общее количество последовательно соединенных ячеек N_s	60

На рис. 2 представлен профиль изменения солнечной радиации, и температуры фотоэлектрической панели в зависимости от времени, используемый при моделировании гибридной системы.

Моделирование топливных элементов. ТЭ – это устройство, используемое для преобразования химической энергии в электрическую энергию постоянного тока, состоящее из двух электродов (анода и катода) и электролита, находящегося между ними. На рис. 3 показан водородный электрический топливный элемент [5, 9].

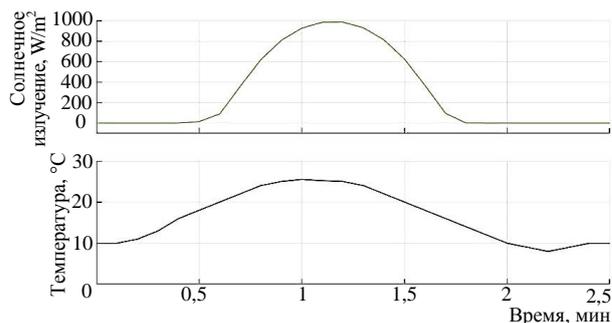


Рис. 2. Входные данные излучения и температуры (в фотоэлектрической модели)

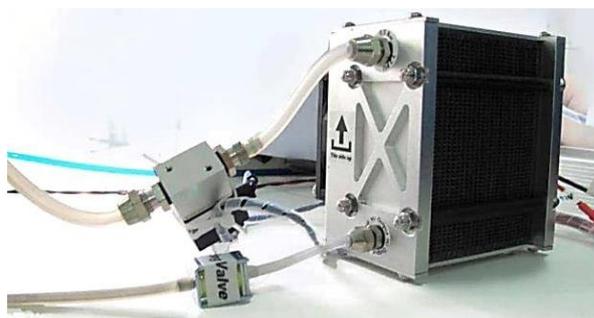


Рис. 3. Внешний вид водородного топливного элемента

Уравнение Нернста используется для описания напряжения топливного элемента на основе изменения свободной энергии Гиббса в происходящих электрохимических реакциях. Уравнение Нернста (3) можно представить следующим образом:

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln(Q), \quad (3)$$

где E – напряжение ячейки; E_0 – стандартный потенциал ячейки; R – газовая постоянная; T – температура; n – число электронов, переданных в реакции; F – постоянная Фарадея; Q – коэффициент реакции.

Характеристики напряжения и мощности в зависимости от тока смоделированного топливного элемента мощностью 6 кВт показаны на рис. 4.

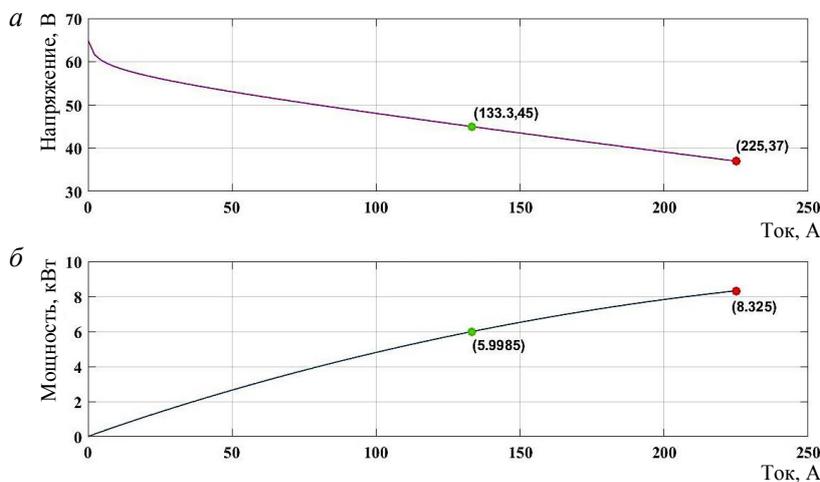


Рис. 4. Характеристики топливного элемента: а – кривая V-I; б – кривая P-I

Электролизер. На рис. 5 показана электролитическая ячейка электролизера мощностью 10 кВт. Избыточная энергия, вырабатываемая фотоэлектрическим источником, используется в электролизере для разделения воды на водород и кислород. Этот процесс включает в себя сложные электрохимические реакции и гидродинамику, что делает Simulink идеальным инструментом для моделирования электролизерных систем [9, 10].

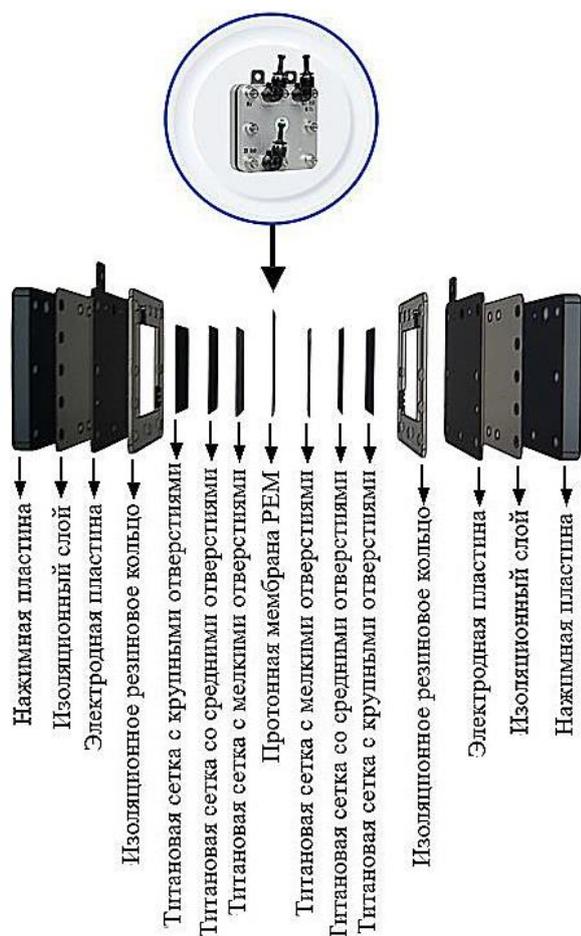


Рис. 5. Электролитическая ячейка электролизера для производства водорода и кислорода

При работе электролизера рабочее напряжение отдельной ячейки представляет собой сумму обратного напряжения и перенапряжения. Оно называется рабочим напряжением ячейки и может быть получено с помощью следующего уравнения:

$$U_{EL,cell} = U_{EL,Rev} + \mu_{act} + \mu\Omega, \quad (4)$$

где $U_{EL,cell}$ – рабочее напряжение одной ячейки; $U_{EL,Rev}$ – обратное напряжение; μ_{act} , $\mu\Omega$ – потери на активацию и омические потери.

Батарея электролизера состоит из группы ячеек, соединенных последовательно, поэтому напряжение на клеммах батареи электролизера следующее:

$$U_{EL,stack} = M U_{EL,cell} \cdot \quad (5)$$

Ниже приведены параметры электролизера, используемого в работе (табл. 3).

Таблица 3

Характеристики электролизера, использованного в работе

Параметры	Единицы измерения
Количество ячеек, соединенных последовательно	12 ячеек
Потребляемая мощность	< 10 кВт
Производство водорода, л/ч	до 2000 л/ч
Производство кислорода, л/ч	до 1000 л/ч
Давление	0–5 бар
Температура	10–60 °С
Чистота газообразного водорода	99,97–99,99 %
Чистота газообразного кислорода	99 %

Моделирование резервуара для хранения водорода. Данное моделирование необходимо необходимо для оценки производительности системы хранения водорода. Расход водорода при рабочем давлении рассчитывается следующим образом:

$$P = z \frac{m_{H_2} RT_{tank}}{MV_{tank}} + P_{initial}, \quad (6)$$

где P – давление газа, Па; m_{H_2} – массовое значение водорода; R – газовая постоянная; T_{tank} – абсолютная температура газа, К; V_{tank} – объем газа, м³; z – коэффициент сжимаемости. Размер резервуара для хранения водорода определяется количеством водорода, потребляемого топливным элементом.

Моделирование аккумулятора. В работе была использована литий-ионная батарея благодаря ее высокой эффективности и простоте интеграции в гибридные системы возобновляемой энергетики (табл. 4) [6].

Уравнения моделирования аккумулятора – это математические уравнения, которые описывают поведение и производительность аккумуляторной системы. Эти уравнения обычно представляют электрохимические процессы, происходящие внутри батареи, и используются для понимания и прогнозирования ее напряжения, тока и емкости.

Напряжение на клеммах аккумулятора описывается как

$$U_{BAT} = E_{BAT,0} - I_{BAT} R_i - C \frac{q}{q - I_t} (I_t + I^F) + Z_{exp}(t), \quad (7)$$

где U_{BAT} – выходное напряжение аккумулятора; $E_{BAT,0}$ – постоянное напряжение аккумулятора; C – константа поляризации, В/(А·ч), или сопротивление поляризации Ω ; q – емкость аккумулятора; I_t – фактический заряд аккумулятора, А·ч; Z_{exp} – постоянная времени экспоненциальной зоны; R_i – внутреннее сопротивление, Ω ; I_{BAT} – ток батареи, А; I^F – фильтрованный ток, А.

Таблица 4

Характеристики литий-ионной батареи

Параметры	Характеристики
Литий-железо-фосфатная батарея LiFePO_4	12,8 В
Емкость	100 А·ч
Производитель	Power Sonic Corporation
Марка	Power Sonic PSL-BT-121000-G27
Тип	Литий-ионный
Тип разряда	Глубокий разряд

Описание гибридной системы (PV/ТЭ/АК) и метода управления

На рис. 6 показана схема автономной PV/ТЭ/АК системы, состоящей из солнечных фотоэлектрических элементов, преобразователей постоянного тока, топливных элементов, электролизера, резервуаров с водородом и нагрузки. Электролизер, баки с водородом и ТЭ действуют как резервные системы хранения и генерации электрической энергии, тогда как солнечная энергия работает как основной источник. Топливный элемент служит вторичным

(вспомогательным) источником для обеспечения необходимой мощности [7].

Система фотоэлектрических панелей и топливный элемент подключаются к шине постоянного тока через повышающий преобразователь постоянного тока. Для подключения аккумулятора используется двуправленный преобразователь, для подключения электролизера к шине постоянного тока – понижающий преобразователь. Эти преобразователи управляют блоками системы и регулируют поток энергии между компонентами системы [5]. Источники питания и накопители подключаются к бытовой нагрузке через инвертор. Проведено имитационное исследование для жилой нагрузки с пиковой мощностью 3 кВт и минимальной нагрузкой 1 кВт (рис. 7), с учетом изменения температуры, солнечного света и скорости ветра в течение усредненных зимних суток в городе Насирия Республики Ирак.

Аккумуляторная батарея рассматривалась как резервный источник, участвующий в питании нагрузки, поэтому были проведены расчеты по выбору подходящей группы батарей для системы.

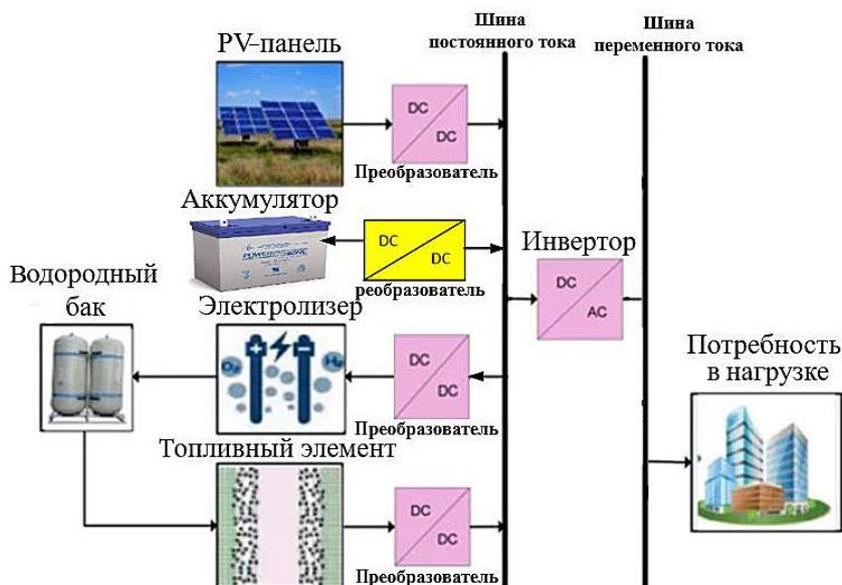


Рис. 6. Блок-схема гибридной автономной системы электроснабжения на базе возобновляемой энергии

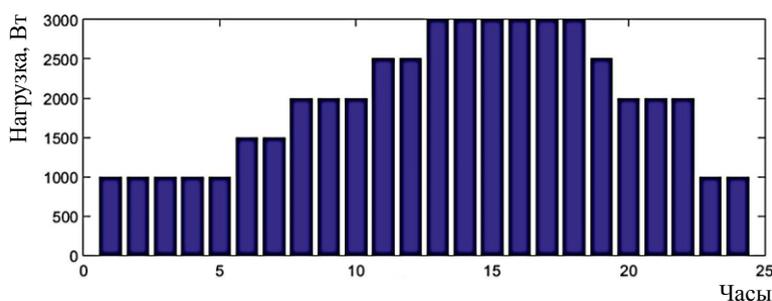


Рис. 7. Изменения мощности нагрузки жилого объекта в течение типичных зимних суток с учетом температуры, инсоляции и скорости ветра

Чтобы определить размер фотоэлектрической системы, необходимо найти общую мощность потребления. Требуемая мощность для системы равна мощности, необходимой электролизеру, добавленной к мощности, необходимой нагрузке в дневное время, в дополнение к мощности, необходимой зарядному устройству, с учётом количества часов работы [7]. Чтобы получить необходимую мощность фотоэлектрических панелей, учитывались погодные условия, в том числе уровень освещенности и температура. Для этого использовался код MATLAB при расчете параметров компонентов гибридной системы и определении времени работы каждого компонента. На рис. 8 показаны изменения температуры, инсоляции и скорости ветра в течение типичного зимнего дня для выбранного объекта.

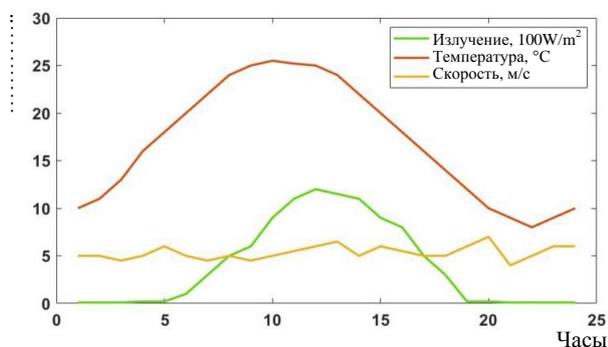


Рис. 8. Изменение температуры, инсоляции и скорости ветра в обычный зимний день

По данным производителя, выработка водорода с помощью электролизера мощностью 10 кВт равна 2000 л/ч. С учетом времени работы в 8 часов, общий объем выработанного водорода должен составить 16 000 л, но фактически насчитывает 14 500 л. Причиной снижения выработки является работа не на максимальной мощности из-за изменений в солнечном излучении и меньшей генерации фотоэлектрическими панелями (рис. 9).

Топливный элемент работает с 18:00 до 23:00 (всего 5 ч) (рис. 10). В течение этого времени ТЭ обеспечивает общую нагрузку жилого дома.

Выработанная и потребленная мощность в течение одного дня приведена на рис. 11. Топливный элемент работает в течение 5 ч, с 18:00 до 23:00 ч. Однако аккумуляторы обеспечивают нагрузку с 24:00 до 8:00 утра и с 17:00 до 18:00 вечера (рис. 11). Когда заряд батареи положительный, это означает, что она разряжается. Во время зарядки аккумулятора происходит уход выработанной мощности в отрицательную зону.

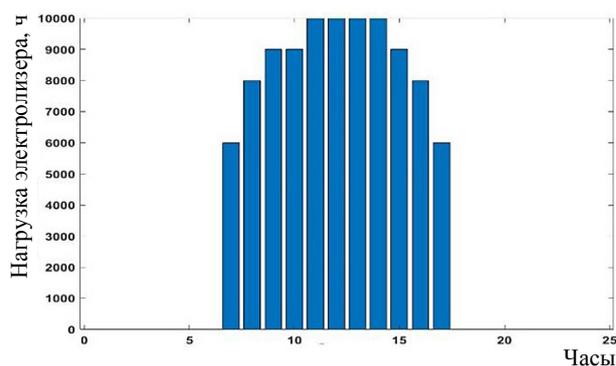


Рис. 9. Нагрузка электролизера в течение суток

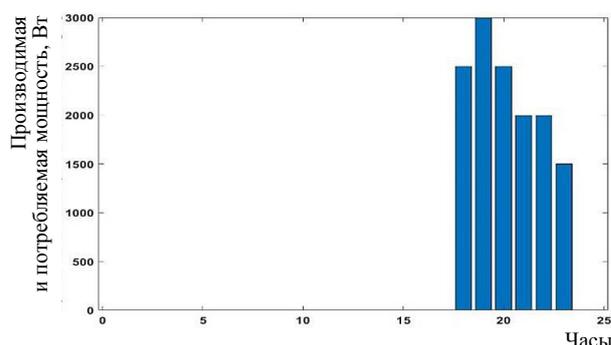


Рис. 10. Выходная мощность генератора топливных элементов часов

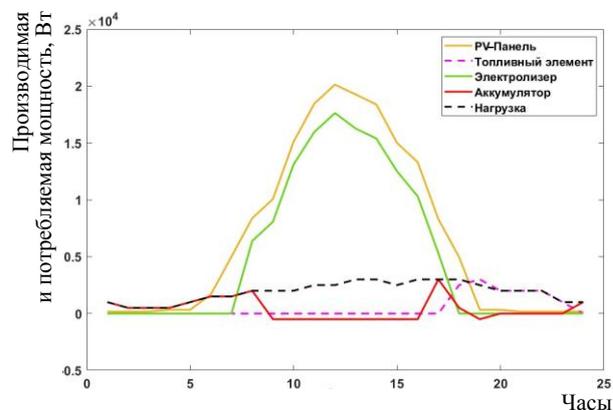


Рис. 11. Выработанная и потребленная мощность за сутки

На рис. 12 показана модель Simulink автономной системы PV/ТЭ/АК. Система состоит из фотоэлектрических панелей, топливных элементов, электролизера, аккумуляторных батарей и бытовой нагрузки.

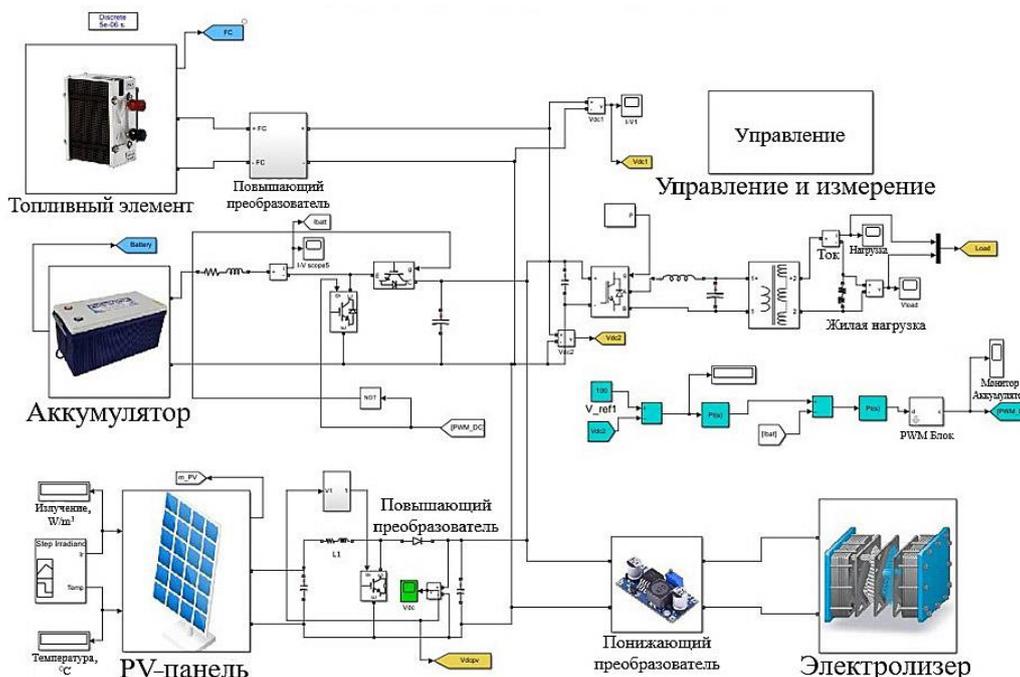


Рис. 12. Модель Simulink автономной системы PV/ТЭ/АК

Результаты исследования

Ввод солнечного излучения в фотоэлектрическую модель показан на рис. 13. Значение освещенности начинается от 600 Вт/м^2 и увеличивается до 1000 Вт/м^2 .

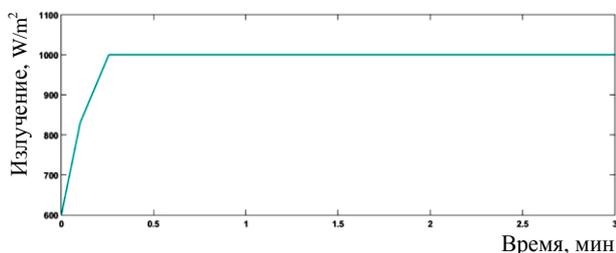


Рис. 13. Вход солнечного излучения в фотоэлектрическую модель

Режимы работы автономной PV/ТЭ/АК энергосистемы могут варьироваться в зависимости от конкретной конструкции и конфигурации. Однако, как правило, существует несколько основных режимов работы.

Режим PV. В этом режиме система работает исключительно за счет солнечной энергии, улавливаемой PV-панелями. Фотоэлектрические панели преобразуют солнечный свет в электричество, которое затем используется для непосредственного питания нагрузки, хранения в аккумуляторе или для производства водорода с целью последующего использования. В дневное время, когда доступна солнечная энергия, система работает в фотоэлектрическом режиме.

На рис. 14 показана мощность, вырабатываемая фотоэлектрическими панелями в случае фотоэлектрического режима. На рис. 15 приведен ток электролизера в случае фотоэлектрического режима,

имеющий синусоидальную форму с пиковым значением, не превышающим 25 А.

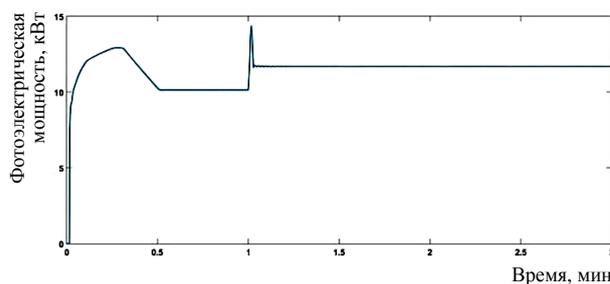


Рис. 14. Солнечная мощность в режиме PV

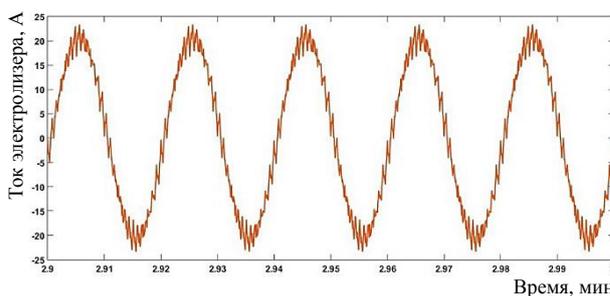


Рис. 15. Ток электролизера в фотоэлектрическом режиме

Гибридный режим. В этом режиме фотоэлектрические панели и топливные элементы работают вместе, обеспечивая потребности в нагрузке. Фотоэлектрические панели генерируют электроэнергию из солнечного света, а любая избыточная энергия направляется в аккумулятор для хранения и дальнейшего использования. Однако, если энергии, генерируемой фотоэлектрическими панелями, недостаточно для удовлетво-

ния потребности нагрузки, активируется система топливных элементов. Топливный элемент преобразует водород и кислород в электрическую энергию, обеспечивая дополнительную мощность для удовлетворения потребности нагрузки. Таким образом, гибридный режим гарантирует надежное и непрерывное электроснабжение за счет использования PV-модулей и резервного источника питания (ТЭ), когда это необходимо. На рис. 16 показано напряжение топливного элемента, а на рис. 17 – ток ТЭ в гибридном режиме.

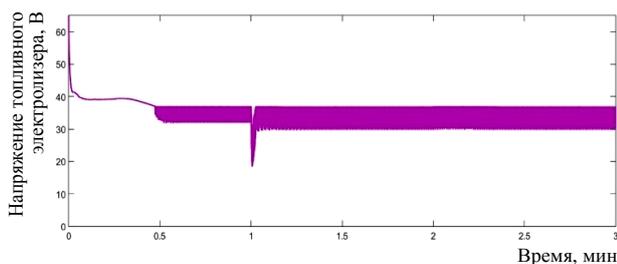


Рис. 16. Напряжение топливного элемента

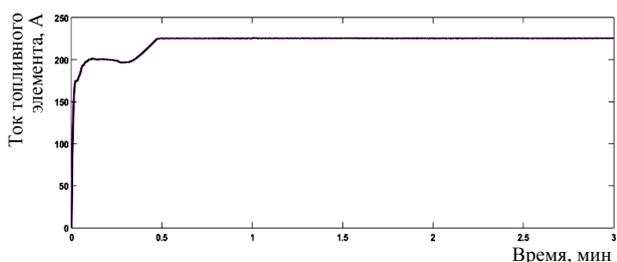


Рис. 17. Ток топливного элемента в гибридном режиме

Режим топливных элементов. В этом режиме проводится исследование для моделирования энергетической системы PV–электролизер–ТЭ в реальном сценарии. Исследуется предлагаемая стратегия, согласно которой водород является долгосрочным хранилищем энергии для балансировки сезонных колебаний возобновляемой генерации и спроса на нагрузку, а аккумулятор – кратковременным хранилищем энергии для балансировки ежедневных колебаний выработки и нагрузки. Ночью фотоэлектрические панели не производят электроэнергию. Таким образом, основным источником является ТЭ.

На рис. 18 показано напряжение ТЭ в случае его монорежима работы, а на рис. 19 – ток ТЭ при работе в монорежиме. Ток находится на максимальном значении из-за высокой нагрузки на ТЭ.

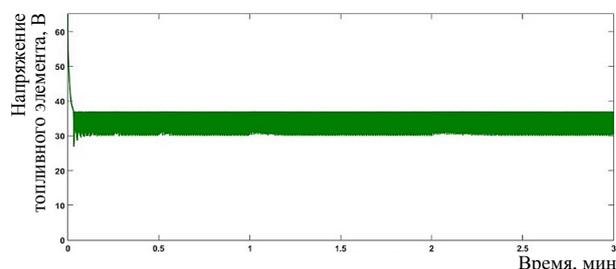


Рис. 18. Напряжение топливного элемента в монорежиме работы

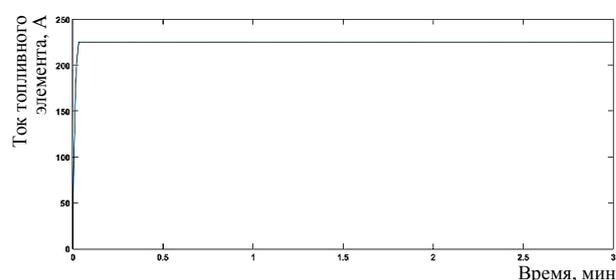


Рис. 19. Ток топливного элемента в монорежиме работы

На рис. 20 показано напряжение и ток нагрузки в случае монорежима работы ТЭ. Существует фазовый сдвиг между напряжением и током из-за реактивной мощности, потребляемой инвертором. Коэффициент мощности в этом случае составляет 0,9.

Режим работы от аккумулятора. Система переходит в режим работы от аккумулятора, когда солнечной энергии недостаточно или она недоступна. В этом режиме нагрузка питается за счет энергии, накопленной в аккумуляторе. Данная настройка гарантирует постоянное электропитание даже при минимальной солнечной инсоляции или её отсутствии. На рис. 21 показано напряжение и ток бытовой нагрузки в случае режима работы от аккумулятора.

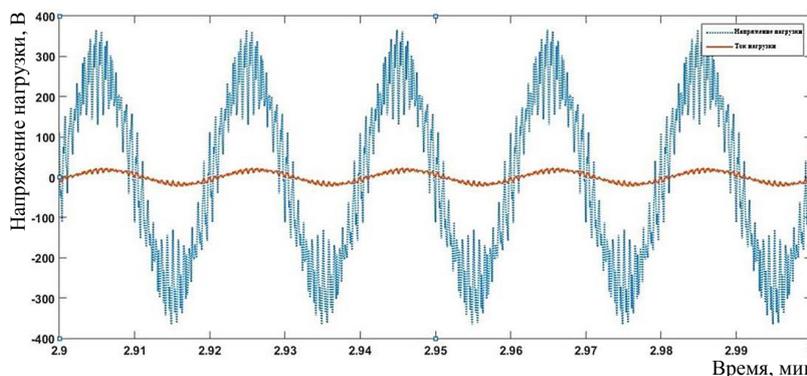


Рис. 20. Напряжение и ток нагрузки в монорежиме работы топливного элемента

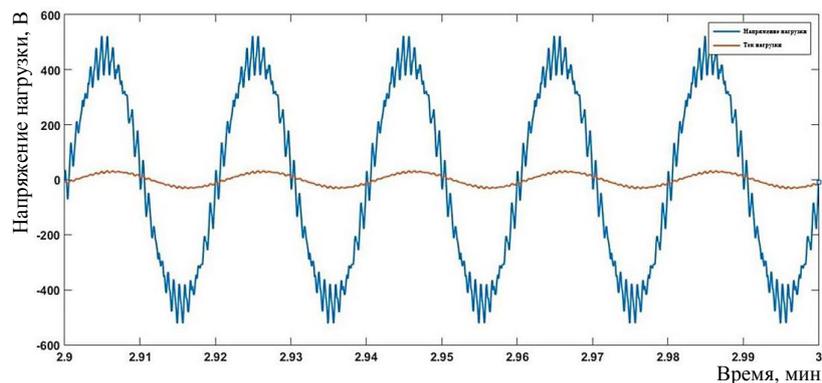


Рис. 21. Напряжение и ток бытовой нагрузки в режиме работы от аккумулятора

Выводы

Результаты моделирования процесса перетока энергии между компонентами автономной гибридной фотоэлектрической системы / системы на топливных элементах могут различаться в зависимости от конкретных параметров и допущений, использованных при моделировании. Однако есть общие результаты оптимального режима работы ее компонентов, которые можно наблюдать.

1. *Производство энергии.* Моделирование может дать представление о возможностях системы по выработке энергии. Оно показывает количество электроэнергии, вырабатываемой фотоэлектрическими PV-панелями и ТЭ, с учетом таких факторов, как солнечное излучение, температура и доступность топлива. Результаты моделирования прогнозируют общую мощность производства энергии в системе. Согласно полученным результатам моделирования предлагаемой автономной энергосистемы, фотоэлектрические PV-панели и ТЭ вырабатывают 10,6 МВт·ч/год электроэнергии, а ее приведенная стоимость составит 0,13 \$.

2. *Хранение энергии.* Моделирование позволяет оценить компонент системы хранения энергии, обычно использующей аккумуляторные батареи. Оно поможет оценить производительность аккумуляторной батареи с точки зрения циклов заряда и разряда, состояния разряда и общей емкости АК (количество циклов заряда и разряда составляет ≥ 5000 циклов ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$) с глубиной разряда до 80 %, величина потерь на саморазряд АК не превышает 6 % ежемесячно). Эта информация имеет решающее значение для определения того, может ли система удовлетворить потребности в нагрузке в периоды низкого уровня выработки энергии или ее отсутствия.

3. *Потребность в энергии.* Моделирование позволяет спроектировать профиль потребности в энергии с учетом таких факторов, как требования к нагрузке, времени суток и сезонные колебания. Сравнивая выработку энергии с потребностью, моделирование может определить, способна ли система удовлетворить

требования к нагрузке или существует какой-либо дефицит энергии (спроектированная автономная гибридная система вырабатывает в общей сложности 29,3 кВт·ч/день за счет солнечных панелей, топливных элементов и аккумуляторов, а среднесуточное потребление домохозяйством, постоянное в течение года, составляет 22,6 кВт·ч/день, что позволяет полностью обеспечить потребность объекта в электрической энергии и обеспечить заряд компонентов системы хранения энергии).

4. *Эффективность системы:* моделирование позволяет рассчитать общую эффективность автономной системы PV/ТЭ-элементов. В предлагаемой системе было использовано 46 фотоэлектрических панелей мощностью по 340 Вт каждая и топливные элементы суммарной мощностью 6 кВт, поскольку для Ирака характерен жаркий климат и преобладание ясной погоды в течение всего года. Применяемое моделирование может учитывать потери при преобразовании, передаче и хранении энергии, чтобы получить представление о том, насколько эффективно система использует доступные возобновляемые ресурсы для удовлетворения потребителя в электрической энергии. Эта информация помогает оптимизировать конструкцию системы и определить пути ее улучшения (численное соотношение фотоэлектрических PV-модулей / ТЭ элементов в зависимости от метеоклиматических условий района размещения автономной гибридной системы с фотоэлектрическими солнечными панелями, водородной подсистемой и аккумулятором).

В целом результаты моделирования автономной системы PV/ТЭ элементов могут помочь в оптимизации конструкции системы, оценке экономической целесообразности и понимании производительности системы в различных сценариях. Эти результаты имеют решающее значение для принятия решений, особенно при рассмотрении вопроса об интеграции возобновляемых источников энергии в существующую энергетическую инфраструктуру.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Использование гибридных ветро-солнечных систем для энергоснабжения города Аль-Наджаф в Республике Ирак / Л.М. Абдали, М.Н. Аль-Малики, К.А. Али [и др.] // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 3. С. 82–91. doi:10.22213/2413-1172-2022-3-82-91
2. Rezk H., Alghassab M., Ziedan, H.A. An Optimal Sizing of Stand-Alone Hybrid PV-Fuel Cell-Battery to Desalinate Seawater at Saudi NEOM City // *Processes*. 2020. № 8. P. 382. URL : <https://doi.org/10.3390/pr8040382> (дата обращения: 10.05.2025).
3. Исследование режимов работы комбинированных солнечно-ветровых установок для обеспечения уличного освещения / Л.М. Абдали, Х.А. Исса, М.Н. Аль-Малики [и др.] // *Строительство и техногенная безопасность*. 2022. № 25(77). С. 75–85.
4. Использование метода отслеживания точки максимальной мощности для увеличения эффективности работы фотоэлектрических установок / Л.М. Абдали, М.Н. Аль-Малики, Х.А. Исса [и др.] // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2022. Т. 20, № 4. С. 106–116. doi:10.22213/2410-9304-2022-4-106-116
5. Sizing and Design of a PV-Wind-Fuel Cell Storage System Integrated into a Grid Considering the Uncertainty of Load Demand Using the Marine Predators Algorithm / F.S. Mahmoud, A.M. Abdelhamid, A. Al Sumaiti // *Mathematics*. 2022. № 10. P. 3708. URL : <https://doi.org/10.3390/math10193708> (дата обращения: 03.03.2025).
6. Study of Hybrid Wind–Solar Systems for the Iraq Energy Complex / L.M.Abd Ali, F.M. Al-Rufae, V.V. Kuvshinov [et al.] // *Appl. Sol. Energy*. 2020. Vol. 56, № 4. Pp. 284–290. URL : <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027> (дата обращения: 03.03.2025).
7. Darwesh M.R., Ghoname M.S. Experimental studies on the contribution of solar energy as a source for heating biogas digestion units // *Energy Reports*. 2021. 7. Pp. 1657–1671.
8. Frequency control of PV-connected micro grid system using fuzzy logic controller / T. Rajesh, B. Gunapriya, M. Sabarimuthu [et al.] // *Materials Today: Proceedings*. 2021. № 45. Pp. 2260–2264. doi:10.1016/j.matpr.2020.10.255
9. 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.
10. Falcão D.S., Pinto A.M.F.R. A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners // *Journal of cleaner production*. 2020. № 261. P. 121184.
11. The effect of voltage and electrode types on hydrogen production powered by photovoltaic system using alkaline and PEM electrolyzers / M. Benganem, H. Almohamadi, S. Haddad [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. № 57. Pp. 625–636.
12. Issa H.A., Mohammed H.J., Abdali L.M. Mathematical Modeling and Controller for PV System by Using MPPT Algorithm // *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2021. Vol. 24, № 1. Pp. 96–101. doi:10.22213/2413-1172-2021-1-96-101
13. HRajavel A., Rathina Prabha N. Fuzzy logic controller-based boost and buck-boost converter for maximum power point tracking in solar system // *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2021. № 43(4). Pp. 945–957.
14. Computational analysis of preheating cylindrical lithium-ion batteries with fin-assisted phase change material / K.J. Anand, Pallabi Kakati, Devendra Dandotiya [et al.] // *International Journal of Modern Physics C (IJMPC)*. 2024. Vol. 35, № 04. Pp. 1–16.
15. Molkov V., Dadashzadeh M., Makarov D. Physical model of onboard hydrogen storage tank thermal behaviour during fuelling // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44, № 8. Pp. 4374–4384.
16. Numerical investigation on influence of gas and turbulence model for type III hydrogen tank under discharge condition / Kim Moo-Sun, Joon-Hyoung Ryu, Seung-Jun Oh [et al.] // *Energies*. 2020. Vol. 13, № 23. Pp. 6432.
17. Energy management strategies, control systems, and artificial intelligence-based algorithms development for hydrogen fuel cell-powered vehicles: a review / Oladosu Temidayo Lekan, Jagadeesh Pasupuleti, Tiong Sieh Kiong [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. № 61. Pp. 1380–1404.
18. Issa H.A., Abdali L.M., Velkin V.I. A stand-alone hybrid power system based on PV energy and hydrogen fuel cells with energy storage systems // *MM Science Journal*. 2024. doi:http://doi.org/10.17973/MMSJ.2024_12_2024102
19. Ahmed Mohammed H., Ansari M.O.H., Mohammed Abd Ali L. Electricity generation by using a hybrid system (photovoltaic and fuel cell) // *Journal of Engineering and Applied Science*. 2019. № 14. Pp. 4414–4418.

REFERENCES

1. Ispol’zovanie gibridnyh vetro-solnechnykh sistem dlya elektrosnabzheniya goroda Al-Nadzhaif v Respublike Irak [Using hybrid wind-solar power systems for power supply to Al-Najaf City in Iraq] L.M. Abdali, M.N. Al-Maliki, Q.A. Ali [et al.] // *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022. T. 25, № 3, pp. 82–91. doi: 10.22213/2413-1172-2022-3-82-91.
2. Rezk, H.; Alghassab, M.; Ziedan, H.A. An Optimal Sizing of Stand-Alone Hybrid PV-Fuel Cell-Battery to Desalinate Seawater at Saudi NEOM City. *Processes* 2020, № 8. P. 382. URL : <https://doi.org/10.3390/pr8040382> (data obrasheniya 10.05.2025).
3. Issledovanie rezhimov raboty kombinirovannykh solnechno-ventrovyykh ustanovok dlya obespecheniya ulichnogo osveshcheniya [Study of operating modes of combined solar-wind installations to provide street lighting] L.M. Abdali, H.A. Issa, M.N. Al-Maliki [et al.]. *Stroitel’stvo i tehnogennaya bezopasnost’*. 2022. № 25(77). S. 75–85.
4. Issledovanie metoda otslezhivaniya tochki maksimal’noy moshchnosti dlya uvelicheniya effektivnosti raboty fotoelektricheskikh ustanovok [Using the maximum power point tracking method to increase the efficiency of photovoltaic installations] // L.M. Abdali, M.N. Al-Maliki, H.A. Issa [et al.]. *Intellektual’nye sistemy v proizvodstve*. 2022. T. 20, № 4. S. 106–116. doi: 10.22213/2410-9304-2022-4-106-116.
5. Sizing and Design of a PV-Wind-Fuel Cell Storage System Integrated into a Grid Considering the Uncertainty of Load Demand Using the Marine Predators Algorithm / F.S. Mahmoud, A.M. Abdelhamid, A. Al Sumaiti // *Mathematics*. 2022. № 10. P. 3708. URL : <https://doi.org/10.3390/math10193708> (дата обращения: 03.03.2025).

6. Study of Hybrid Wind–Solar Systems for the Iraq Energy Complex / L.M. Abd Ali, F.M. Al-Rufae, V.V. Kuvshinov [et al.] // *Appl. Sol. Energy*. 2020. Vol. 56, № 4. Pp. 284–290. URL : <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027> (data obrashcheniya: 03.03.2025).
7. Darwesh M.R., Ghoname M.S. Experimental studies on the contribution of solar energy as a source for heating biogas digestion units // *Energy Reports*. 2021. № 7. Pp. 1657–1671.
8. Frequency control of PV-connected micro grid system using fuzzy logic controller / T. Rajesh, B. Gunapriya, M. Sabarimuthu [et al.] // *Materials Today: Proceedings*. 2021. № 45. Pp. 2260–2264. doi:10.1016/j.matpr.2020.10.255
9. 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.
10. Falcão D.S., Pinto A.M.F.R. A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners // *Journal of cleaner production*. 2020. № 261. P. 121184.
11. The effect of voltage and electrode types on hydrogen production powered by photovoltaic system using alkaline and PEM electrolyzers / M. Benghanem, H. Almohamadi, S. Haddad [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. № 57. Pp. 625–636.
12. Issa H.A., Mohammed H.J., Abdali L.M. Mathematical Modeling and Controller for PV System by Using MPPT Algorithm // *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2021. Vol. 24, № 1. Pp. 96–101. doi:10.22213/2413-1172-2021-1-96-101
13. HRajavel A., Rathina Prabha N. Fuzzy logic controller-based boost and buck-boost converter for maximum power point tracking in solar system // *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2021. № 43(4). Pp. 945–957.
14. Computational analysis of preheating cylindrical lithium-ion batteries with fin-assisted phase change material / K.J. Anand, Pallabi Kakati, Devendra Dandotiya [et al.] // *International Journal of Modern Physics C (IJMPC)*. 2024. Vol. 35, № 04. Pp. 1–16.
15. Molkov V., Dadashzadeh M., Makarov D. Physical model of onboard hydrogen storage tank thermal behaviour during fuelling // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44, № 8. Pp. 4374–4384.
16. Numerical investigation on influence of gas and turbulence model for type III hydrogen tank under discharge condition / Kim Moo-Sun, Joon-Hyoung Ryu, Seung-Jun Oh [et al.] // *Energies*. 2020. Vol. 13, № 23. Pp. 6432.
17. Energy management strategies, control systems, and artificial intelligence-based algorithms development for hydrogen fuel cell-powered vehicles: a review / Oladosu Temidayo Lekan, Jagadeesh Pasupuleti, Tiong Sieh Kiong [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. № 61. Pp. 1380–1404.
18. Issa H.A., Abdali L.M., Velkin V.I. A stand-alone hybrid power system based on PV energy and hydrogen fuel cells with energy storage systems // *MM Science Journal*. 2024. doi:http://doi.org/10.17973/MMSJ.2024_12_2024102
19. Ahmed Mohammed H., Ansari M.O.H., Mohammed Abd Ali L. Electricity generation by using a hybrid system (photovoltaic and fuel cell) // *Journal of Engineering and Applied Science*. 2019. № 14. Pp. 4414–4418.

Информация об авторах

Исса Хайдер Абдулсахиб Исса – аспирант кафедры «Атомные электростанции и возобновляемые источники энергии»;
В.И. Велькин – доктор технических наук, профессор кафедры «Атомные электростанции и возобновляемые источники энергии»;
Абдали Лаит Мохаммед Абдали – кандидат технических наук;
В.В. Кувшинов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников энергии»;
С.П. Муровский – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика».

Information about the authors

Issa Hayder A. – Postgraduate Student, Nuclear power plants and renewable energy sources department;
V.I. Velkin – Doctor of Science (Engineering), Associate Professor Nuclear power plants and renewable energy sources department;
Abdali Layth M. – Candidate of technical sciences, PhD;
V.V. Kuvshinov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor Energy systems and complexes of traditional and renewable energy sources Department;
S.P. Murovsky – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics Department.

Статья поступила в редакцию 04.12.2024; одобрена после рецензирования 03.03.2025; принята к публикации 17.03.2025.
The article was submitted: 04.12.2024; approved after reviewing: 03.03.2025; accepted for publication: 17.03.2025.

Научная статья
УДК 621.316.925.1
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-47-54

ВЫБОР ЧИСЛА СКРЫТЫХ НЕЙРОНОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ В СЕТЯХ НЕТЯГОВЫХ И РАЙОННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Ковалев Андрей Анатольевич¹, Основин Дмитрий Иванович², Микава Александр Ваноевич³

^{1, 2, 3} Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

¹ kovalev_alexey@mail.ru

² d.osnowin2013@yandex.ru

³ avmikava@usurt.ru

Аннотация. Рассмотрены ключевые аспекты применения машинного обучения для выявления аварийных режимов работы в сетях нетяговых и районных потребителей. Основной акцент сделан на выборе оптимального числа скрытых нейронов в нейронной сети, что критически важно для повышения точности классификации режимов работы. Исследование охватывает все этапы подготовки данных, начиная с их сбора и очистки и заканчивая разделением на обучающие, валидационные и тестовые выборки.

Предложены рекомендации по выбору архитектуры нейронной сети, включая определение числа скрытых нейронов, влияющих на производительность модели.

Проведены эксперименты с различными конфигурациями нейронных сетей, показавшие, что увеличение числа скрытых нейронов до определенного предела способствует снижению ошибки классификации.

Полученные результаты свидетельствуют, что выбранные методы позволяют существенно снизить ошибку классификации, достигая точности свыше 95 % на тестовых данных. Наибольшая точность достигается при использовании 19 скрытых нейронов.

Ключевые слова: машинное обучение, нейронные сети, гиперпараметрическая настройка, число скрытых нейронов, классификация режимов работы, подготовка данных, выборки данных, регуляризация, ансамблевые методы, *MATLAB-Simulink*, точность классификации, ошибка классификации, среднеквадратическая ошибка

Original article

SELECTING THE NUMBER OF HIDDEN NEURONS FOR DETECTING EMERGENCY MODES IN NON-TRACTION AND DISTRICT CONSUMER NETWORKS

Kovalev Andrey A.¹, Osnowin Dmitry I.², Mikava Aleksandr V.³

^{1, 2, 3} Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

¹ kovalev_alexey@mail.ru

² d.osnowin2013@yandex.ru

³ avmikava@usurt.ru

Abstract. The paper considers the key aspects of applying machine learning to detect emergency modes of operation in the networks of non-traction and district consumers. The main emphasis is placed on selecting the optimal number of hidden neurons in the neural network, which is critical for improving the accuracy of operation mode classification. The study covers all stages of data preparation, from data collection and cleaning to partitioning into training, validation and test samples.

Recommendations on the choice of neural network architecture are proposed, including the determination of the number of hidden neurons affecting the model performance.

Experiments with different configurations of neural networks were carried out, which showed that increasing the number of hidden neurons up to a certain limit contributes to the reduction of classification error.

The results show that the chosen methods can significantly reduce the classification error, achieving an accuracy of over 95 % on the test data. The highest accuracy is achieved using 19 hidden neurons.

Keywords: machine learning, neural networks, hyperparametric tuning, number of hidden neurons, operation modes classification, data preparation, data sampling, regularisation, ensemble methods, *MATLAB-Simulink*, classification accuracy, classification error, RMS error

Применение машинного обучения для выявления аварийных режимов работы в сетях нетяговых и районных потребителей требует тщательного подхода к выбору архитектуры модели, подготовке данных и настройке гиперпараметров. Рассмотрен аспект гиперпараметрической настройки параметров нейронной сети, а именно выбор числа скрытых нейронов.

Тема выбора числа скрытых нейронов недостаточно широко освещена в публикациях. В статье [1] основное внимание уделяется рассмотрению вопросов диагностики, прогнозирования изменений электрических параметров, повышения селективности релейной защиты и совершенствованию алгоритмов работы микропроцессорных устройств фидеров контактной сети железных дорог переменного тока. Выбор числа скрытых нейронов упоминается в контексте обсуждения возможностей нейросетевого подхода к созданию системы унифицированных шаблонов электрических параметров сети, используемой для диагностики предаварийных режимов работы, но подробного рассмотрения процедуры выбора числа скрытых нейронов или демонстрации специальных методик для его обоснованного определения в тексте не приводится.

Статья [2] посвящена вопросам автоматизации микропроцессорных устройств релейной защиты на основе нейросетевых технологий. Основной акцент сделан на создании и обучении искусственной нейронной сети, способной сопоставлять информацию о текущей поездной ситуации с параметрами электрической сети и формировать унифицированные шаблоны в виде хеш-кодов. При этом, несмотря на подробное описание архитектуры и принципов работы нейронной сети, процедура выбора числа скрытых нейронов в данной статье не рассматривается. Отсутствие обоснования выбора числа скрытых нейронов оставляет неопределённость относительно адекватности предложенной архитектуры нейронной сети.

Проанализированные источники не рассматривают проблему выбора числа скрытых нейронов. Вместо этого авторы сосредотачиваются на вопросах формирования нейросетевых шаблонов, автоматической диагностики, а также методов коррекции данных и обработки ошибок.

Рассмотрим основные шаги, необходимые для разработки алгоритма машинного обучения для выявления аварийных режимов работы.

1. Сбор и подготовка данных

Для начала необходимо собрать данные о работе сети, нормальных и аварийных режимах работы. Данные могут включать такие параметры, как напряжение, ток, частота, мощность и другие показатели. Важно убедиться, что набор данных содержит достаточное количество примеров для каждого класса (нормальный режим и различные виды замыканий).

Подготовка данных включает следующие этапы.

I. Очистка данных: удаление пропущенных значений, выбросов и шумов.

II. Нормализация данных: приведение всех признаков к одному масштабу.

III. Разделение данных: разделение набора данных на обучающую, тестовую и валидационную выборки.

На вход нейронной сети подаются данные нормальной и аварийной работы защищаемой сети, которые должны быть предварительно обработаны и разделены на три группы: обучающие, валидационные и тестовые наборы. Это делается для того, чтобы избежать переобучения модели и получить объективную оценку ее производительности.

Обучающие данные (*Training Data*)

Используются для непосредственного обучения модели, содержат наборы признаков и соответствующие им метки классов (0 – нормальный режим, 1 – аварийный режим). На этом этапе происходит обновление весов и смещений нейронной сети на основании ошибок предсказаний. Обучающие данные составляют около 60–80 % от общего объема данных.

Валидационные данные (*Validation Data*)

Применяются для настройки гиперпараметров модели и предотвращения переобучения, оценивают качество модели в процессе обучения, позволяют отслеживать прогресс обучения и предотвращают переобучение. Валидационные данные составляют примерно 10–20 % от общего объема данных.

Тестовые данные (*Test Data*)

Тестовые данные не участвуют в процессе обучения, служат для независимой оценки производительности модели, резервируются для финальной проверки модели после окончания процесса обучения и составляют около 10–20 % от общего объема данных.

2. Выбор архитектуры нейронной сети

Для задачи классификации можно использовать многослойный перцептрон (*MLP*), сверточную нейронную сеть (*CNN*) или рекуррентную нейронную сеть (*RNN*), в зависимости от структуры данных.

Входной слой принимает числовые значения признаков, преобразованные и нормализованные. Число входных нейронов равно количеству признаков, используемых для классификации

$$N_{input} = n,$$

где n – число признаков.

Скрытый слой выполняет основные вычисления и преобразовывает входные данные в более сложные представления. Количество нейронов в скрытом слое влияет на способность модели к обобщению и её производительность

$$N_{hidden} = m,$$

где m – число нейронов в скрытом слое.

Выходной слой генерирует окончательные предсказания класса. В случае бинарной классификации выходной слой обычно состоит из одного нейрона, принимающего значения в диапазоне от 0 до 1, что интерпретируется как вероятность принадлежности к классу 1 (или положительного класса).

3. Обучение модели

После определения архитектуры модели её нужно обучить на подготовленных данных, это включает следующие шаги.

Инициализация весов

Обучение модели: передача данных через слои нейронной сети и корректировка весов на основе ошибки предсказания.

Оценка качества модели: проверка точности модели на валидационной выборке после каждой эпохи обучения.

Функция активации играет ключевую роль в определении выхода нейрона на основе взвешенной суммы его входных данных.

Оценка и улучшение модели

После завершения обучения важно оценить качество модели на тестовой выборке. Если результаты неудовлетворительны, можно попробовать улучшить модель следующими способами:

1) регуляризацией: добавление регуляризации (например, $L1$ или $L2$) для предотвращения переобучения;

2) гиперпараметрической настройкой: изменение количества слоев, числа нейронов в каждом слое, функции активации, оптимизатора и других параметров;

3) использованием ансамблевых методов: объединение нескольких моделей для повышения точности.

Обучение модели включает в себя минимизацию ошибки между предсказанными и истинными метками классов.

Определение начальных весов

Подбор начальных весов в нейронной сети выбирается случайным образом. Обычно применяются числа в диапазоне от -1 до 1 . При обучении нейронной сети в зависимости от величины ошибки на выходе сети от желаемого результата распределяются и меняются значения весовых коэффициентов. Цель алгоритма – минимизация величины ошибки на выходе сети от желаемого результата до значений приемлемого уровня.

Так как необходимо различать только два режима работы защищаемой сети (нормальный и аварийный), то достаточно применять один нейрон на выходном слое.

Количество скрытых нейронов в нейронной сети не является строго вычисляемой величиной и обычно подбирается эмпирическим путем. Это связано с тем, что оптимальное число скрытых нейронов зависит от множества факторов, таких как

сложность задачи, размер обучающей выборки, архитектура сети и многие другие.

Выбор количества скрытых нейронов в нейронной сети – это сложный процесс, требующий учета многих факторов. В статье проводится исследование по подбору оптимального количества скрытых нейронов для решения задачи выявления аварийных режимов работы в сетях нетяговых и районных потребителей. Для моделирования нормальных и аварийных режимов работы защищаемого объекта (структурная схема которого представлена на рис. 1) использовался программный комплекс *MATLAB-Simulink*.

В программном обеспечении *MatLab* есть мощный инструмент работы для проектирования и обучения нейронных сетей *Neural Time Series*, с помощью которого можно обучить нейронную сеть классификации входных данных по набору целевых признаков [3–6]. При работе в *MatLab* возможно создать и обучить нейронную сеть, а также оценить ее эффективность благодаря широкому набору встроенных инструментов оценки, а также реализовать полученную нейронную сеть с помощью программного кода. Для работы с нейронными сетями в среде *MatLab* доступны следующие приложения:

- *Pattern Recognition app*;
- *Fitting app*;
- *Time Series app*.

Все три приложения предлагают различные функциональные возможности и предназначены для решения разных типов задач. Проанализируем, какой инструмент лучше применять в зависимости от поставленной задачи.

1. *Pattern Recognition app*

Основное назначение: приложение ориентировано на задачи распознавания образов и классификации. Применяется, когда нужно классифицировать объекты на основе определенных признаков.

Пример использования: подходит для задачи классификации режимов работы защищаемой сети на основе входных данных.

2. *Fitting app*

Основное назначение: приложение предназначено для построения моделей регрессии, т.е. для поиска зависимостей между переменными.

Пример использования: применяется для задач, связанных с прогнозированием значений на основе существующих данных (например, предсказание потребления электроэнергии) [7].

3. *Time Series app*

Основное назначение: специализируется на анализе и прогнозировании временных рядов, помогая выявить закономерности и тренды в данных, сбалансированных в определенные моменты времени.

Пример использования: применяется для задач, связанных с прогнозированием поведения временных рядов данных (например, прогнозирование нагрузки на энергосистему на основе предыдущих данных).

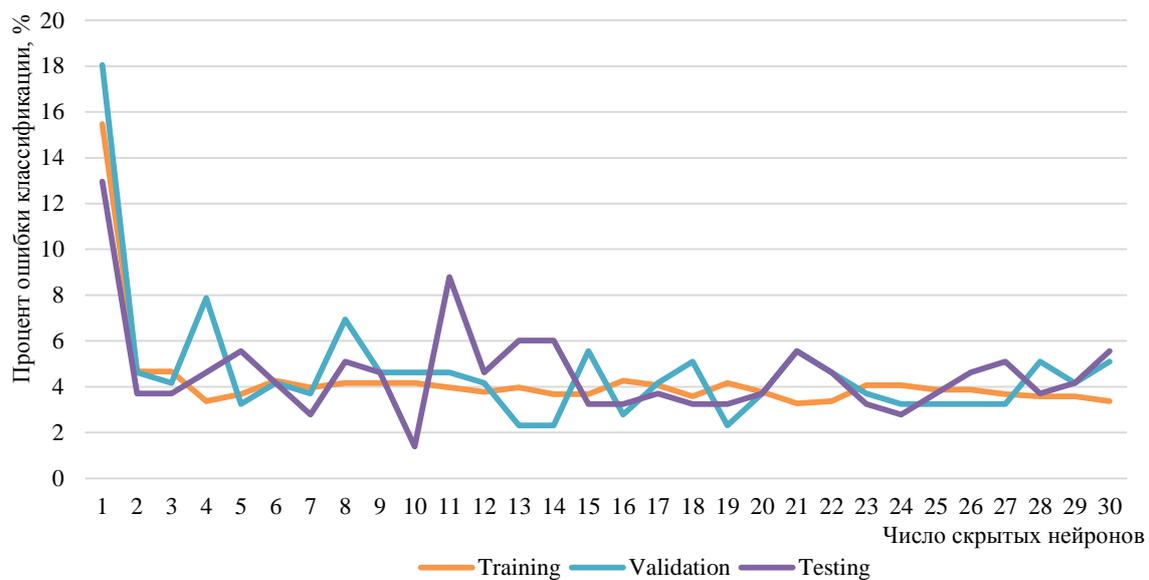


Рис. 2. Влияние числа скрытых нейронов на процент ошибки классификации

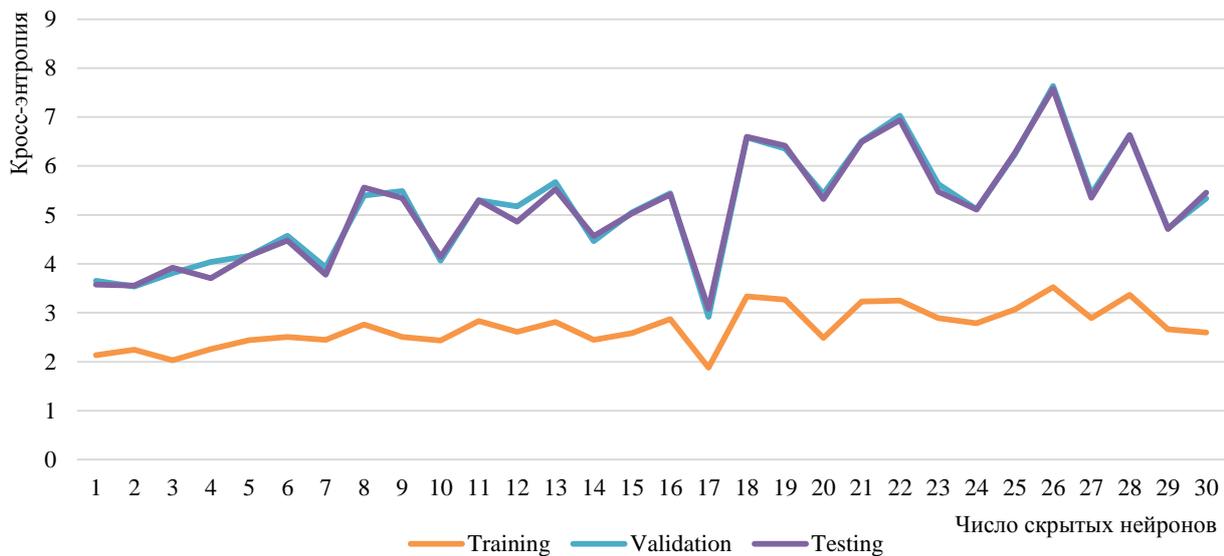


Рис. 3. Влияние числа скрытых нейронов на минимизацию кросс-энтропии

В табл. 2 представлены данные по оценке кросс-энтропии для наиболее оптимального количества скрытых нейронов.

Таблица 2

Оценка кросс-энтропии для наиболее оптимального количества скрытых нейронов

Количество скрытых нейронов	Оценка кросс-энтропии			Среднее значение точности моделей
	Training	Validation	Testing	
17	1,881	2,917	3,079	2,625667

Кросс-энтропия используется для измерения расхождения между двумя вероятностными распределениями. В контексте машинного обучения

она измеряет разницу между истинным распределением классов и предсказанным распределением. Формально кросс-энтропия определяется как

$$H(p, q) = - \sum_{i=1}^N p_i \log(q_i),$$

где p – истинное распределение; q – предсказанное распределение.

Минимизация кросс-энтропии приводит к улучшению точности модели, так как это означает, что предсказанные вероятности становятся ближе к истинным значениям. Чем больше значение кросс-энтропии, тем хуже предсказание модели совпадает с реальными данными.

Анализ влияния числа скрытых нейронов на минимизацию кросс-энтропии показывает следующее.

1. **Минимизация кросс-энтропии.** Кросс-энтропия служит мерой ошибки модели и стремится к минимуму при оптимальном числе скрытых нейронов. В данном случае, с увеличением количества скрытых нейронов до 17, наблюдалось снижение кросс-энтропии на этапах обучения и валидации.

2. **Изменение кросс-энтропии.** На этапе тестирования кросс-энтропия возросла до 3,079, что может свидетельствовать о начале переобучения модели при дальнейшем увеличении числа скрытых нейронов.

3. **Средняя точность моделей.** Среднее значение точности моделей, рассчитанное как среднее значение кросс-энтропии, на всех этапах составило 2,625667. Это значение указывает на общий уровень ошибки модели при классификации.

4. **Оптимальное количество скрытых нейронов.** Наименьшая кросс-энтропия была достигнута при семнадцати скрытых нейронах, что делает это количество оптимальным для минимизации ошибки и повышения точности модели.

Таким образом, 17 скрытых нейронов представляют собой оптимальное количество для снижения кросс-энтропии и улучшения точности модели в задаче классификации режимов работы защищаемой сети.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. **Оптимальное количество скрытых нейронов:** для задачи классификации режима работы защищаемой сети оптимальное количество скрытых нейронов составляет 19. Это количество обеспечивает минимальную ошибку классификации и наилучшую точность модели.

2. **Влияние количества скрытых нейронов на ошибку классификации:** с увеличением количества скрытых нейронов до 19 наблюдается снижение ошибки классификации. После девятнадцати нейронов ошибка начинает расти, что указывает на переобучение модели.

3. **Стабильность модели:** модель с девятнадцатью скрытыми нейронами демонстрирует стабильную производительность на этапах обучения, валидации и тестирования, что подтверждается низкими значениями ошибок и высокой корреляцией между предсказанными и фактическими значениями.

4. **Адаптивность модели:** модель с девятнадцатью скрытыми нейронами обладает хорошей обобщающей способностью и может эффективно классифицировать новые, ранее не встречавшиеся данные.

С увеличением количества скрытых нейронов в нейронной сети наблюдается тенденция к уменьшению ошибки на выходе сети. Однако этот эффект достигает своего максимума при определен-

ном количестве нейронов. В данном случае, после девятнадцати скрытых нейронов, ошибка начинает увеличиваться.

Таким образом, для достижения наилучших результатов в задаче классификации режима работы защищаемой сети рекомендуется использовать 19 скрытых нейронов.

Количество скрытых нейронов, которое дает наилучшие результаты, может значительно отличаться в зависимости от выбранного метода и характера данных. Например, в задаче классификации может быть достаточно одного выходного нейрона, тогда как в регрессии не исключено, что потребуются несколько нейронов для предсказания непрерывных значений. Соответственно, количество скрытых нейронов тоже будет различным. Поэтому для одной архитектуры нейронной сети оптимальное количество скрытых нейронов может составлять 19, тогда как для другой архитектуры данное число изменится. Это связано с особенностями конкретных методов и структур данных, с которыми они работают.

Разработанный алгоритм машинного обучения представляет собой усовершенствованную архитектуру нейронной сети, оптимизированную для выявления аварийных режимов в сетях нетяговых и районных потребителей электроэнергии. Основное преимущество данного подхода заключается в повышении точности классификации, достигаемой посредством подбора гиперпараметров, среди которых ключевым фактором выступает точное определение числа скрытых нейронов.

Достоинства алгоритма

Высокая точность классификации: при применении предложенной конфигурации нейронной сети с числом скрытых нейронов, равным 19, удается достигнуть точности классификации порядка 95 %. Такой показатель не уступает аналогичным показателям традиционных методов идентификации аварийных режимов.

Экспериментальная валидированность: предложенный алгоритм прошел ряд экспериментов, подтверждающих стабильность и воспроизводимость результатов. Подтверждено, что данная структура нейронной сети предотвращает переобучение и сохраняет хорошую степень обобщаемости, что подтверждено показателями средней точности на тестовом множестве.

Операционная гибкость: архитектура нейронной сети допускает простую модификацию под разные условия эксплуатации, позволяя адаптироваться к изменяющейся нагрузке и параметрам внешней среды. Такое свойство гарантирует универсальность применения и широкую область внедрения алгоритма.

Инструментальная совместимость: решение базируется на стандартных пакетах и библиотеках,

таких как MATLAB-Simulink, что повышает технологическую доступность алгоритма.

В данной статье рассмотрены основные этапы разработки алгоритма машинного обучения для выявления аварийных режимов работы в сетях нетяговых и районных потребителей. Особое внимание уделено процессу гиперпараметрической настройки нейронной сети, в частности, выбору оптимального числа скрытых нейронов. Были проведены обширные эксперименты, показавшие, что правильное определение этого параметра значительно влияет на точность классификации. Результаты, полученные на реальных данных с использованием *MATLAB-Simulink*, подтверждают эффективность предложенных методов.

Основные выводы заключаются в следующем.

1. Важность подготовительных этапов: тщательная подготовка данных, включая очистку, нормализацию и разделение на обучающие, валидационные и тестовые выборки, имеет решающее значение для успешного обучения модели.

2. Оптимизация числа скрытых нейронов: экспериментально установлено, что оптимальное число скрытых нейронов составляет 19, что позволило достичь минимальной ошибки классификации в 3,24 %. Этот результат был подтвержден на независимых тестах с использованием данных реальной защищаемой сети.

3. Влияние архитектуры сети: использование двухслойной нейронной сети с обратной связью и сигмоидальными скрытыми нейронами дало лучшие результаты по сравнению с другими исследованными архитектурами.

4. Методы улучшения модели: внедрение регуляризации и ансамблевых методов позволило дополнительно повысить точность модели и снизить риск переобучения.

Запланированные направления дальнейшего исследования включают разработку гибридных моделей нейронных сетей для ещё большей точности и изучение возможности адаптации алгоритмов к изменяющимся условиям эксплуатации сетей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Повышение селективности работы микропроцессорной релейной защиты фидеров контактной сети железных дорог переменного тока / М.В. Востриков, А.В. Данеев, К.В. Менакер, В.Н. Сизых // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 5. С. 358–372. EDN: GRQTGM. doi:10.24412/2071-6168-2022-5-358-372
2. Автоматизация устройств микропроцессорной релейной защиты на основе использования нейросетевых технологий / В.Н. Сизых, А.В. Данеев, М.В. Востриков, К.В. Менакер // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 11. С. 324–337. EDN: PDUDLU. doi:10.24412/2071-6168-2021-11-324-337
3. Куликов А.Л. Оценка информационных признаков для построения алгоритмов релейной защиты // Актуальные проблемы электроэнергетики : сборник научно-технических статей. 2018. С. 190–195.
4. Бездушный Д.И. Формирование обобщенных признаков срабатывания релейной защиты на основе метода главных компонент // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 1(34). С. 20–27.
5. Алгоритм дерева решений в задаче распознавания сложных аварийных режимов электрической сети / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, Д.И. Бездушный, Б.В. Папков // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : материалы 95-го заседания Международного научного семинара. 2023. С. 484–493.
6. Применение метода опорных векторов при реализации многомерной релейной защиты / А.Л. Куликов, Д.И. Бездушный, М.В. Шарыгин, В.Ю. Осокин // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко. 2019. С. 25–34.
7. Ковалев А.А. Модель оценки качества электропотребления нетяговых железнодорожных потребителей // Инновационный транспорт. 2023. № 1(47). С. 54–58.
8. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. Москва : Вильямс, 2007. 1407 с.
9. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс : пер. с английского. 2-е изд., испр. Москва : Вильямс, 2006. 1103 с.
10. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта : пер. с пол. И.Д. Рудинского. Москва : Горячая линия – Телеком, 2010. 520 с. С. 503–514.

REFERENCES

1. Povyshenie selektivnosti raboty mikroprotsessornoj relejnoj zashchity fiderov kontaktnoj seti zheleznykh dorog peremennogo toka [Increasing the selectivity of microprocessor relay protection of feeders of the contact network of AC railways] / M.V. Vostrikov, A.V. Daneev, K.V. Menaker, V.N. Sizykh // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. 2022. № 5. S. 358–372. EDN: GRQTGM. doi:10.24412/2071-6168-2022-5-358-372
2. Avtomatizatsiya ustrojstv mikroprotsessornoj relejnoj zashchity na osnove ispol'zovaniya nejrosetevykh tehnologij [Automation of microprocessor relay protection devices based on the use of neural network technologies] / V.N. Sizykh, A.V. Daneev, M.V. Vostrikov, K.V. Menaker // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. 2021. № 11. S. 324–337. EDN: PDUDLU. doi:10.24412/2071-6168-2021-11-324-337
3. Kulikov A.L. Otsenka informatsionnykh priznakov dlya postroeniya algoritmov relejnoj zashchity [Evaluation of information attributes for the construction of relay protection algorithms] // Aktual'nye problemy elektroenergetiki : sbornik nauchno-tehnicheskikh statej. 2018. S. 190–195.

SELECTING THE NUMBER OF HIDDEN NEURONS FOR DETECTING EMERGENCY MODES IN NON-TRACTION AND DISTRICT CONSUMER NETWORKS

4. Bezdushny D.I. Formirovanie obobshchennykh priznakov srabatyvaniya relejnoj zashchity na osnove metoda glavnnykh komponentov [Formation of the generalized relay protection triggering signs on the basis of the principal component method] // Relejnaya zashchita i avtomatizatsiya. 2019. № 1(34). S. 20–27

5. Algoritm dereva reshenij v zadache raspoznavaniya slozhnykh avariynnykh rezhimov elektricheskoy seti [Decision tree algorithm in the problem of recognizing the complex emergency modes of the electrical network] / A.L. Kulikov, A.A. Loskutov, D.I. Bezdushny, B.V. Papkov // Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki : Materialy 95-go zasedaniya Mezhdunarodnogo nauchnogo seminar. 2023. S. 484–493.

6. Primenenie metoda opornykh vektorov pri realizatsii mnogomernoy relejnoj zashchity [Application of the support vector method in the realization of multidimensional relay protection] / A.L. Kulikov, D.I. Bezdushny, M.V. Sharygin, V.Yu. Osokin // Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki : mezhdunarodnyj nauchnyj seminar im. Yu.N. Rudenko. 2019. S. 25–34.

7. Kovalev A.A. Model' otsenki kachestva elektropotrebleniya netyagovykh zheleznodorozhnykh potrebitelej [Model of the power consumption quality assessment of the non-tractor railroad consumers] // Innovatsionny transport. 2023. № 1(47). S. 54–58.

8. Russell S., Norvig P. Iskustvenny intellekt. Sovremenny podhod [Artificial intelligence. Modern approach]. Moskva : Williams, 2007. 1407 s.

9. Haykin S. Nejronnye seti: polny kurs [Neural networks: full course] : per. s anglijskogo. 2-e izd., ispr. Moskva : Williams, 2006. 1103 s.

10. Rutkovsky L. Metody i tehnologii iskustvennogo intellekta [Methods and technologies of artificial intelligence] : per s pol. I.D. Rudinskogo. Moskva : Goryachaya Liniya – Telecom, 2010. 520 s. S. 503–514.

Информация об авторах

А.А. Ковалев – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение транспорта»;

Д.И. Основин – аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта»;

А.В. Микава – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта».

Information about the authors

A.A. Kovalev – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Electricity Supply to Transport;

D.I. Osnovin – Post-graduate Student, Department of Electricity Supply to Transport;

A.V. Mikava – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electricity Supply to Transport.

Статья поступила в редакцию 10.03.2025; одобрена после рецензирования 28.05.2025; принята к публикации 28.05.2025.

The article was submitted: 10.03.2025; approved after reviewing: 28.05.2025; accepted for publication: 28.05.2025.

Научная статья
УДК 656.072
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-55-59

ПОВЫШЕНИЕ ПАССАЖИРОПОТОКА ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА НА БАЗЕ РЕФЕРАЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Максимовских Андрей Вячеславович¹, Хисанова Софья Алексеевна², Кулинич Артур Алексеевич³

^{1, 2, 3} Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

¹ AMaksimovskih@usurt.ru

² sonya.khisanova@yandex.ru

³ arthurkulnich@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена возможность увеличения пассажиропотока городского электропоезда в Екатеринбурге посредством внедрения реферальной программы. Проанализирован опыт использования подобных программ в транспортных системах, а также потенциальные выгоды для перевозчика и пассажиров. Описаны механизмы реализации программы. Особое внимание уделено вопросам мотивации участников программы и оценки её эффективности.

Ключевые слова: городской электропоезд, маркетинговые коммуникации, городской наземный транспорт, АО «Свердловская пригородная компания»

Original article

INCREASING THE PASSENGER TRAFFIC OF THE CITY TRAIN BASED ON THE REFERRAL PROGRAM

Maksimovskih Andrey V.¹, Hisanova Sofya A.², Kulnich Arthur A.³

^{1, 2, 3} Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

¹ AMaksimovskih@usurt.ru

² sonya.khisanova@yandex.ru

³ arthurkulnich@yandex.ru

Abstract. The article considers the possibility of increasing the passenger traffic flow of the city train in Ekaterinburg through the introduction of a referral program. The article analyzes the experience of using such programs in transport systems, as well as the potential benefits for the carrier and passengers. The program implementation mechanisms are described. Special attention is paid to the issues of motivation of the program participants and evaluation of its effectiveness.

Keywords: city train, marketing communications, urban land transport, JSC «Sverdlovsk suburban company»

Актуальность городского железнодорожного транспорта (ГЖТ) для транспортного обслуживания мегаполисов и агломераций остается высокой, что обусловлено его эксплуатационными преимуществами: высокой провозной способностью, скоростью сообщения, разгрузкой улично-дорожной сети и экологичностью.

Городской электропоезд представляет собой один из ключевых видов ГЖТ наряду с метрополитеном, монорельсом и трамваем, специализируясь на обеспечении массовых перевозок в границах агломераций. Показательными примерами эффективных систем городских электричек в мировой практике являются: немецкий S-Bahn, французский RER, пригородные линии JR East (Токио), британский London Overground и др. [1–2].

В России городской железнодорожный транспорт действует и развивается в нескольких агломерациях. Первым из таких примеров является Московское центральное кольцо (МЦК), запущенное в 2016 г.,

на данный момент по нему обращаются 242 пары поездов в сутки. Четыре маршрута городского электропоезда действуют в Ростове-на-Дону. Также данный вид транспорта представлен в Красноярске. С 2022 г. организовано движение по четырем диаметрам и кольцевому маршруту в Перми [3–5].

В Екатеринбурге проект «Городская электричка» начал обсуждаться летом 2004 г. главой города и начальником Свердловской железной дороги. Важность этого проекта развития городского железнодорожного транспорта обусловлена растущими агломерационными процессами при наличии только одной ветки метро, имеющей строго диаметральную характеристику. Эти факторы влияют на уровень автомобилизации населения города и региона в целом. На текущий момент Свердловская область занимает 5-е место по количеству личных автомобилей на 1000 человек населения, тем самым превышая общероссийский показатель.

INCREASING THE PASSENGER TRAFFIC OF THE CITY TRAIN BASED ON THE REFERRAL PROGRAM

Запуск городского электропоезда состоялся на 2 года раньше заявленных сроков – 1 сентября 2005 г. В маршрут вошли 11 остановок, включая три специально созданных остановочных пункта. Время в пути следования составляет 27 мин. Существующий маршрут городской электрички Екатеринбурга представлен на рис. 1.

В первый год эксплуатации электропоездом пользовались около 3,8 тыс. пассажиров в день, а уже в 2008 г. среднее количество перевезенных пассажиров составляло около 5 тысяч человек при 9 парах поездов в сутки [6]. Однако даже при растущем пассажиропотоке городской электропоезд продолжал работать в убыток. С 10 мая 2008 г. в целях повышения окупаемости стоимость проезда была увеличена в 1,5 раза – с 12 до 18 руб.

В 2010 г. выполнялось 15 рейсов в сутки с интервалами движения в 2–2,5 ч. В период с 2013 по 2016 гг. в связи с ограничением региональных и федеральных субсидий повышалась стоимость проезда в электропоездах, что негативно сказалось и на пассажиропотоке. В 2018 г. тарифы разделили по зонам, и единая стоимость проезда на всем маршруте стала варьироваться от 29 до 73 руб., в зависимости от дальности перевозки. В феврале 2023 г. был введен Единый городской тариф, который позволил увеличить популярность электропоездов в границах Екатеринбургской агломерации на 21 % [7]. Несмотря на это, уровень востребованности городского электропоезда остается на довольно низком уровне.

В настоящее время перевозки по маршруту в основном выполняются электропоездами пригородного направления (5 поездов в четном направ-

лении и 7 поездов в нечетном). Электропоезд в границах городского маршрута курсирует дважды в день в сторону станции Керамик и один раз в сутки до станции Екатеринбург-Сортировочный и только в рабочие дни.

С момента запуска городской электрички рентабельность данного маршрута постоянно сокращалась из-за уменьшения пассажиропотока (к середине 2024 г. пассажиропоток городского электропоезда составлял менее 900 человек в сутки). В связи с этим была сокращена составность электропоездов и частота их движения в сутки. Одной из причин уменьшения пассажиропотока авторы считают низкую информированность населения об услуге.

Для решения данной проблемы АО «Свердловская пригородная компания» (СПК) использует маркетинговые коммуникации, которые включают в себя информирование клиентов о торговой марке, услуге, распространение сведений об услуге или бренде, повышение культуры рынка и создание положительного имиджа компании или бренда. СПК периодически проводит акции, связанные с предоставлением бонусов и скидок пассажирам городского электропоезда при предъявлении билета. Как правило, эти акции связаны с посещением музеев, развлекательных комплексов и мест регионального туризма [8–10]. Но такие мероприятия не позволяют реализовать потенциал в полной мере, в связи с чем произошёл полный или частичный переход пассажиров на городской наземный транспорт.

На основе данных, описанных выше, авторами был проведен SWOT-анализ проекта «Городская электричка». Результаты анализа представлены на рис. 2.

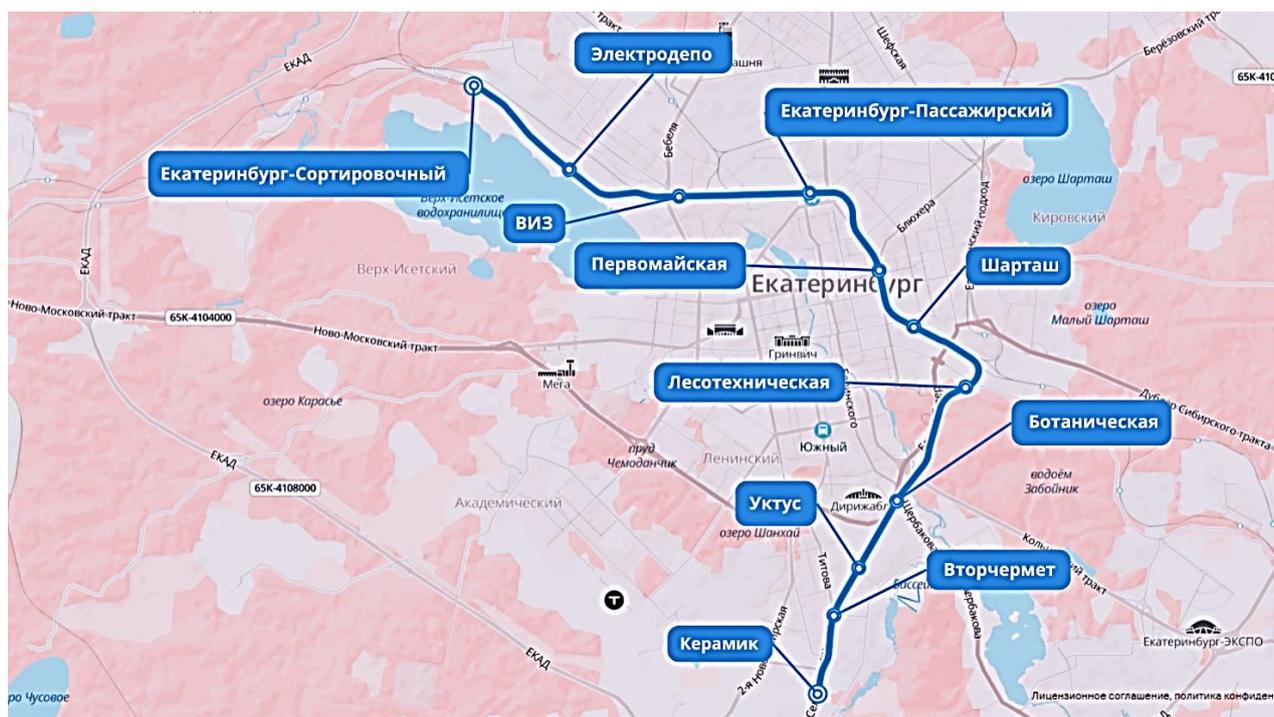


Рис. 1. Карта маршрута городского электропоезда Екатеринбурга



Рис. 2. SWOT-анализ проекта

По результатам проведенного SWOT-анализа выявлены основные преимущества и риски реализации проекта, на основе чего разработана программа мероприятий развития взаимодействия АО «Свердловская пригородная компания» с предприятиями внешнего контура (рис. 3).

В качестве первоочередной меры АО «СПК» рекомендуется заключить партнерские соглашения с предприятиями, расположенными в зонах пешеходной доступности станций городской электрички. На следующем этапе необходимо рассмотреть внедрение реферальной программы. Ее цель – повысить заинтересованность населения в услугах перевозчика путем предоставления бонусов, скидок и участия в акциях партнерских организаций.

Одновременно с этим клиенты предприятий-партнеров должны получать информацию (на информационных носителях в местах обслуживания, через социальные сети, официальные сайты и про-

чие каналы) о доступности комфортного и быстрого железнодорожного сообщения до мест получения услуг. Реализация указанных инициатив направлена на повышение лояльности потенциальных пассажиров к городскому электропоезду и рост пассажиропотока.

Для Екатеринбурга примерами таких предприятий-партнеров АО «СПК» могут быть:

- магазины, которые находятся в ТРЦ «Карнавал», «Таганский ряд», «Пекин» (станция ВИЗ);
- музей советского быта «Сделано в СССР», Уральский федеральный университет (станция Первомайская);
- развлекательный центр «Луна», концертная площадка «Teleclub» (станция Лесотехническая);
- аквапарк «Лимпопо», магазины, которые находятся в ТРЦ «Глобус» и торговом городе «Диржабль» (станция Ботаническая) (рис. 4).

В данном проекте в качестве планируемых результатов реализации рассматриваются:

- увеличение пассажиропотока «Городской электрички»;
- повышение уровня информированности населения об услугах АО «СПК»;
- повышение лояльности бренду ОАО «РЖД»;
- улучшение экологического состояния агломерации;
- увеличение доли ОАО «РЖД» на рынке транспортных услуг региона.

При соблюдении общих вышеописанных принципов анализа действующих систем городского железнодорожного транспорта проект может быть реализован и в других крупных городах, где организовано движение городского электропоезда.

Данное исследование послужит основой для дальнейших разработок экономико-математических моделей и оценки экономического эффекта от взаимодействия перевозчиков с предприятиями внешнего контура.



Рис. 3. Программа мероприятий развития взаимодействия

INCREASING THE PASSENGER TRAFFIC OF THE CITY TRAIN BASED ON THE REFERRAL PROGRAM

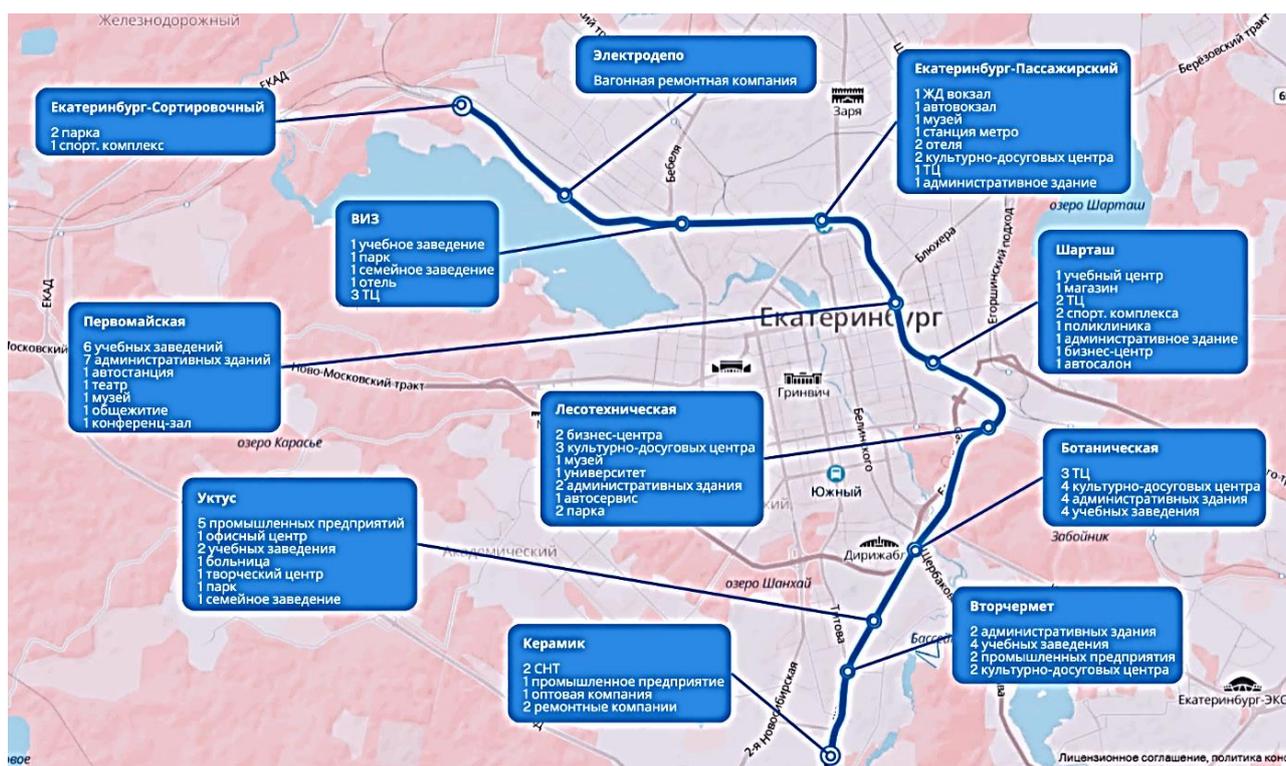


Рис. 4. Перечень компаний, расположенных вблизи станций городской электрички

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. S-Bahn Berlin : офиц. сайт. URL : <https://sbahn.berlin/en/> (дата обращения: 17.02.2025).
2. East Japan Railway Company : офиц. сайт. URL : <https://www.jreast.co.jp/multi/en/> (дата обращения: 17.02.2025).
3. Московский метрополитен : офиц. сайт. URL : <https://mosmetro.ru/passengers/development/mcc/about?ysclid=mbxuoacb79824600299> (дата обращения: 17.02.2025).
4. Северо-Кавказская железная дорога. Городская электричка // ОАО «РЖД». URL : <https://skzd.rzd.ru/ru/5764/page/103290?id=12538&ysclid=mbxx04nv51820432772> (дата обращения: 17.02.2025).
5. Свердловская железная дорога запускает «Ласточки» по кольцевому маршруту и меняет порядок движения электричек в Пермской городской агломерации // ОАО «РЖД». URL : <https://www.rzd.ru/ru/9284/page/3102?id=273102&ysclid=mbxwuyatoe731925485> (дата обращения: 15.02.2025).
6. Свердловская железная дорога. Пресс-центр: «Городская электричка» Екатеринбурга перевезла более 5 млн пассажиров за три года работы // ОАО «РЖД». URL : <https://svzd.rzd.ru/ru/4736/page/104069?id=140079> (дата обращения: 15.02.2025);
7. Хабарова П. Екатеринбургцы за год стали на 21 % чаще ездить по городу на электричках // Коммерсантъ. 2023. URL : <https://www.kommersant.ru/doc/6174605?ysclid=m7aqodyakw154414807> (дата обращения: 17.02.2025).
8. Пассажиры поездов Свердловской пригородной компании получают скидку 50 % в батутный парк // АО «Свердловская пригородная компания». 2021. 15 апр. URL : <https://www.svrpk.ru/news/2588> (дата обращения: 15.02.2025).
9. Пассажиры пригородных поездов могут получить скидку в парк «Галилео» // АО «Свердловская пригородная компания». 2022. 30 дек. URL : <https://www.svrpk.ru/news/2728> (дата обращения: 15.02.2025).
10. Пассажиры пригородных поездов смогут получить скидку в краеведческий музей в Екатеринбурге // АО «Свердловская пригородная компания». 2023. 20 июн. URL : <https://www.svrpk.ru/news/2800> (дата обращения: 15.02.2025).

REFERENCES

1. S-Bahn Berlin : ofits. sait [The official website of S-Bahn Berlin]. URL : <https://sbahn.berlin/en/> (data obrashcheniya: 17.02.2025).
2. East Japan Railway Company : ofits. sait [The official website of the East Japan Railway Company]. URL : <https://www.jreast.co.jp/multi/en/> (data obrashcheniya: 17.02.2025).
3. Moskovskij metropoliten : ofits. sait [The official website of the Moscow subway]. URL : <https://mosmetro.ru/passengers/development/mcc/about?ysclid=mbxuoacb79824600299> (data obrashcheniya: 17.02.2025).
4. Severo-Kavkazskaya zheleznyaya doroga . Gorodskaya elektrichka [The North Caucasian Railway. City train] // ОАО «РЖД» URL: <https://skzd.rzd.ru/ru/5764/page/103290?id=12538&ysclid=mbxx04nv51820432772> (data obrashcheniya: 17.02.2025).
5. Sverdlovskaya zheleznyaya doroga zapuskayet «Lastochki» po kol'tsevomu marshrutu i menyaet poriyadok dvizheniya elektrichek v Permskoj gorodskoj aglomeratsii [Sverdlovsk Railway launches Swallows along the ring route and changes the order of

electric trains in the Perm city agglomeration] // ОАО «RZhD». URL : <https://www.rzd.ru/ru/9284/page/3102?id=273102&ysclid=mbxwyatoc731925485> (data obrashcheniya: 15.02.2025).

6. Sverdlovskaya zheleznyaya doroga. Press-tsentr: «Gorodskaya elektrichka» Yekaterinburga perevezla bolee 5 mln. passazhirov za tri goda raboty [Sverdlovsk Railway. Press center: Yekaterinburg City Train has transported more than 5 million passengers in three years of operation] // ОАО «RZhD». URL: <https://svzd.rzd.ru/ru/4736/page/104069?id=140079> (data obrashcheniya: 15.02.2025).

7. Khabarova P. Yekaterinburzhtsy za god stali na 21 % chashche ezdit' po gorodu na elektrichkah [Yekaterinburg residents 21 % more often traveled around the city by train per year] // Kommersant. 2023. URL : <https://www.kommersant.ru/doc/6174605?ysclid=m7aqodyakw154414807> (data obrashcheniya: 17.02.2025).

8. Passazhiry poyezdov Sverdlovskoj prigorodnoj kompanii poluchat skidku 50 % v batutny park [Passengers of trains of the Sverdlovsk suburban company will receive a 50 % discount in the trampoline park] // АО «Sverdlovskaya prigorodnaya kompaniya». 2021. 15 apr. URL : <https://www.svrpk.ru/news/2588> (data obrashcheniya: 15.02.2025).

9. Passazhiry prigorodnyh poyezdov mogut poluchit' skidku v park «Galileo» [Passengers of suburban trains can get a discount in the Galileo park] // АО «Sverdlovskaya prigorodnaya kompaniya». 2022. 30 dek. URL : <https://www.svrpk.ru/news/2728> (data obrashcheniya: 15.02.2025).

10. Passazhiry prigorodnyh poezdov smogut poluchit' skidku v krayevedcheskij muzej v Yekaterinburge [Passengers of suburban trains will be able to get a discount at the Museum of Local Lore in Yekaterinburg] // АО «Sverdlovskaya prigorodnaya kompaniya». 2023. 20 iyun. URL: <https://www.svrpk.ru/news/2800> (data obrashcheniya: 15.02.2025).

Информация об авторах

А.В. Максимовских – аспирант;
С.А. Хисанова – магистрант группы ТТПмп-213;
А.А. Кулинич – студент группы С-312.

Information about the authors

A.V. Maksimovskih – Post-graduate Student;
S.A. Hisanova – Master Degree Student of ТТPmp-213 group;
A.A. Kulinich – Student of S-312 group.

Статья поступила в редакцию 07.06.2025; одобрена после рецензирования 18.06.2025; принята к публикации 18.06.2025.
The article was submitted: 07.06.2025; approved after reviewing: 18.06.2025; accepted for publication: 18.06.2025.

Научная статья
УДК 625.8
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-60-64

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЯЗКОГО И РАЗЖИЖЕННОГО БИТУМА ПРИ УКРЕПЛЕНИИ ГРУНТОВ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

Павликов Алексей Борисович¹, Каменчуков Алексей Викторович²

^{1,2} Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

¹ 012429@togudv.ru

² 006641@togudv.ru

Аннотация. Рассмотрен вопрос совершенствования структуры грунтов с целью улучшения их физико-механических свойств. Использование данного материала позволит решить проблему повышения несущей способности слоя основания дорожной одежды, а также расширить возможности применения модифицированных грунтов в конструкции дорожной одежды. Проанализированы преимущества и недостатки каждого из этих материалов, с подчеркиванием их значимости в контексте укрепления грунтов и обеспечения долговечности дорожных конструкций. Приводятся рекомендации по оптимальному выбору типа битума в зависимости от конкретных условий строительства и эксплуатации дорог, с учетом их климатических и эксплуатационных особенностей. Исследование направлено на выявление наиболее эффективных и экономически обоснованных решений для укрепления грунтов дорожной одежды с использованием вязкого и разжиженного битума.

Ключевые слова: автомобильная дорога, грунт, дорожная одежда, органическое вяжущее, строительные материалы

Original article

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE USE OF VISCOUS AND LIQUEFIED BITUMEN IN STRENGTHENING ROAD SURFACE SOILS

Pavlikov Alexey B.¹, Kamenchukov Alexey V.²

^{1,2} Pacific National University, Khabarovsk, Russia

¹ 012429@togudv.ru

² 006641@togudv.ru

Abstract. The issue of improving the soil structure in order to improve their physical and mechanical properties is considered. The use of this material will solve the problem of increasing the bearing capacity of the base layer of the pavement, and will also expand the possibilities of using modified soils in the construction of the pavement. The advantages and disadvantages of each of these materials were analyzed, emphasizing their importance in the context of strengthening soils and ensuring the durability of road structures. The article also provides recommendations on the optimal choice of bitumen type depending on the specific conditions of road construction and operation, taking into account their climatic and operational characteristics. The research is aimed at identifying the most effective and economically sound solutions for strengthening pavement soils using viscous and liquefied bitumen.

Keywords: automobile road, soil, pavement, organic binder, building materials

Развитие Дальнего Востока – одна из приоритетных задач Российской Федерации, согласно транспортной стратегии, приказ № 3363-Р от 27.11.2021 г. В суровом климате и сложных геологических условиях региона особое внимание уделяется строительству и эксплуатации дорог, способных выдерживать значительные транспортные нагрузки и обеспечивать безопасное движение транспортных средств.

Источники поверхностного и грунтового увлажнения, а также сезонные температурные колебания оказывают значительное влияние на прочность и долговечность дорожной одежды. Избыточное увлажнение дорожной конструкции приводит к снижению несущей способности, развитию трещин и колееобразованию, ускорению коррозион-

ных процессов, появлению провалов и просадок, а также повышению износа и сокращению срока службы. Вода, проникая в поры и микротрещины покрытия, заполняет пустоты и снижает прочность материалов, способствуя расширению дефектов и ухудшению ровности поверхности дороги. В условиях климата, характеризующегося значительными суточными и сезонными перепадами температур, наблюдаются многократные циклы замораживания и оттаивания, вызывающие усталостные явления в материалах дорожного полотна. Это приводит к образованию трещин, ухудшению герметичности покрытия и дальнейшему проникновению воды, ускоряя процесс деградации дорожной конструкции [1, 2].

Цель исследования – сравнение эффективности применения вязкого и разжиженного битума при укреплении глинистых грунтов для слоя основания дорожной одежды. В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи исследования:

1) рассмотреть существующие методы стабилизации водно-теплового режима дорожной конструкции;

2) провести анализ показателей укрепленного и неукрепленного грунта;

3) разработать состав материала на основании связанных грунтов, укрепленных органическим вяжущим.

Объект исследования – укрепленный грунт, предмет исследования – использование вязкого и разжиженного битума для укрепления грунтов дорожной одежды.

Изменение водно-теплового режима приводит к преждевременному износу дорог, увеличению расходов на содержание и ремонт. Одна из ключевых задач дорожного строительства – разработка эффективных методов стабилизации водно-теплового режима, позволяющих свести к минимуму негативные последствия от воздействия воды и температурных колебаний. Надежность дорожного полотна зависит от множества факторов, наиболее значимыми из которых являются качество используемого грунта и правильная подготовка основания дорожной одежды [3].

Для стабилизации водно-теплового режима используются следующие методы.

1. Дренажные системы.

1.1. Поверхностные дренажи представляют собой систему инженерных сооружений для сбора и отвода дождевых и талых вод с дорожного полотна, предотвращающую их скопление и защищающую земляное полотно и основание дорожного покрытия от влаги.

1.2. Подземные дренажи представляют собой инженерную систему для отвода грунтовых вод и снижения их уровня, улучшающую устойчивость грунтов и защищающую дорожные конструкции от влаги, размывов, подтоплений и деформаций, а также снижающую риски образования трещин и деформаций в конструкциях, находящихся в контакте с увлажненными грунтами.

2. Геосинтетические материалы [4].

2.1. Геотекстильное полотно обеспечивает свободный пропуск жидкости, задерживая мелкие ча-

стицы грунта, что предотвращает засорение дренажных систем и образование застоев воды. Оно отводит влагу из дорожного полотна, снижая риск промерзания и деформаций от морозного пучения.

2.2. Геомембрана формирует непроницаемый слой, предотвращающий проникновение влаги и промерзание грунта, а также служит тепловым изолятором, уменьшая температурные колебания в дорожной конструкции.

3. Методы укрепления и стабилизации грунтов [5].

3.1. Укрепление грунта (повышение физико-механических характеристик) позволяет создать прочный материал (аналог каменного материала), минимизирующий деформации под воздействием внешних нагрузок, включая транспортные и климатические факторы. Материал характеризуется пониженной водопроницаемостью, ограничивающей проникновение влаги в нижние слои дорожного полотна и снижающей риск насыщения и последующего промерзания грунта, предотвращая, таким образом, морозное пучение и сопутствующие деформации. Благодаря вяжущим веществам укрепленный грунт проявляет повышенную устойчивость к температурным колебаниям.

3.2. Стабилизация грунта (повышение водно-физических характеристик) через введение вяжущих веществ снижает его водопроницаемость, предотвращая насыщение влагой и последующее промерзание, что минимизирует риск морозного пучения и деформаций.

Научная новизна исследования состоит в разработке новых составов материалов для укрепления грунтов оснований дорожных одежд с использованием органического вяжущего материала.

Укрепление и стабилизация грунта связаны между собой, их различия заключаются в целях и методах выполнения работ. Укрепление направлено на повышение прочности грунта, в то время как стабилизация сосредоточена на обеспечении его долговременной устойчивости и снижении влияния внешних факторов [6, 7].

Согласно ГОСТ Р 70452–2022 «Грунты, стабилизированные и укрепленные неорганическим вяжущим» понятие «укрепление» подразумевает грунт, обработанный органическими, минеральными или комплексными вяжущими с целью повышения их физико-механических свойств. В табл. 1 приведено сравнение показателей по типу укрепления грунта.

Таблица 1

Сравнение показателей укрепленного и неукрепленного грунта

Критерий сравнения	Неукрепленный грунт	Органическое вяжущее	Неорганическое вяжущее	Укрепленный грунт (комплексное вяжущее)
Прочность	Низкая	Средняя	Высокая	Высокая
Водопроницаемость	Средняя	Средняя	Высокая	Низкая
Эластичность	Низкая	Высокая	Низкая	Средняя
Долговечность	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая
Устойчивость к динамическим нагрузкам	Низкая	Низкая	Средняя	Средняя
Теплоизоляционные свойства	Низкие	Средние	Средние	Средние
Морозостойкость	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE USE OF VISCOUS AND LIQUEFIED BITUMEN IN STRENGTHENING ROAD SURFACE SOILS

Структурообразование в укрепленном грунте состоит из следующих этапов.

1. Подготовительный: выбор проектного решения и исходных материалов, а также проектирование итогового состава в лаборатории.

2. Основной: формирование микроструктурных связей – последовательности дозирования, скорости и интенсивности перемешивания, температурно-временных режимов перемешивания, при необходимости транспортировки.

3. Завершающий: формирование макроструктуры (при укладке и уплотнении).

4. Эксплуатационный: стабилизация структуры и свойств укрепленных грунтов [8].

В ранее выполненных исследованиях [9] были подобраны оптимальные соотношения грунта, цемента и воды для создания однородной цементогрунтовой смеси, выполнен обзор существующих методов модификации цементогрунтов и укрепления грунтов, в том числе отходами промышленности. В табл. 2 представлены результаты испытаний укрепленного грунта.

По итогам проведенного эксперимента при визуальном осмотре выявлено, что вязкий битум не распределяется равномерно в грунте. Для повышения водостойкости основания и дальнейшего использования грунта во 2-м и 3-м типе местности по условиям увлажнения использовалось комплекс-

ное вяжущее. Было предложено разжижить битум и повторить проведенный эксперимент с идентичным составом (табл. 3).

Итогом проведения лабораторных испытаний стали следующие результаты. Образцы с составом: грунт, вода, битум (7 %, разжиженный) показали увеличение предела прочности на сжатие на 178 % в сравнении с данным составом, но вязким битумом. В случае с составом: грунт, вода, цемент (10 %), битум (7 %, разжиженный) увеличение прочности составило 6% в сравнении с укрепленным грунтом, где был применен вязкий битум. В целях повышения прочностных показателей укрепленного грунта часть минеральной части заменена на пластиковые частицы: 3, 5 и 7 %, так как пластик обладает лучшими упруго-пластичными свойствами, чем грунт.

На рис. 1 представлен внешний вид образцов грунта, укрепленного вязким и разжиженным битумом.

При добавлении пластиковых частиц в связный грунт пластические свойства могут изменяться, делая его менее восприимчивым к сжатию и усадке. Это связано с тем, что пластик уменьшает контакт между частицами грунта, снижая трение и сцепление, и при этом пластик уменьшает пористость грунта, что влияет на его способности удерживать влагу. Это, в свою очередь, может привести к изменению водно-физических характеристик грунта.

Результаты испытаний укрепленного грунта (вязкий битум)

Таблица 2

Параметры	Образцы						
	1	2	3	4	5	6	7
Грунт, вода, битум (7 %)							
Разрушающая нагрузка, кН	0,5	0,44	0,46	0,42	0,56	0,65	0,6
Поверхностная плотность ρ , г/см ³	1,867	1,851	1,856	1,904	1,968	1,914	1,954
Предел прочности, МПа	0,25	0,22	0,23	0,21	0,28	0,325	0,3
Среднее 0,259							
Грунт, вода, цемент (10 %), битум (7 %)							
Разрушающая нагрузка, кН	4,13	3,28	3,63	3,28	6,35	5,87	5,59
Поверхностная плотность ρ , г/см ³	1,932	1,939	1,930	1,917	1,966	1,947	1,921
Предел прочности, МПа	2,065	1,64	1,815	1,64	3,175	2,935	2,795
Среднее 2,295							

Результаты испытаний укрепленного грунта

Таблица 3

Параметры	Образцы						
	1	2	3	4	5	6	7
Грунт, разжиженный битум (7 %), вода							
Разрушающая нагрузка, кН	0,81	1,00	1,3	1,7	2,18	1,37	1,76
Поверхностная плотность ρ , г/см ³	1,938	1,934	1,993	1,985	1,978	1,972	1,966
Предел прочности, МПа	0,405	0,5	0,65	0,85	1,09	0,685	0,88
Среднее 0,722							
Грунт, цемент (10 %), вода, разжиженный битум (7 %)							
Разрушающая нагрузка, кН	4,95	4,36	4,38	4,54	5,88	4,95	5,01
Поверхностная плотность ρ , г/см ³	1,988	1,857	1,797	1,974	1,891	1,953	1,973
Предел прочности, МПа	2,475	2,180	2,190	2,270	2,940	2,475	2,505
Среднее 2,434							

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЯЗКОГО И РАЗЖИЖЕННОГО БИТУМА ПРИ УКРЕПЛЕНИИ ГРУНТОВ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ



Рис. 1. Внешний вид образцов укрепленного грунта: а – вязкий битум; б – разжиженный битум

При добавлении пластиковых частиц в связный грунт с добавлением разжиженного битума частицы действуют как заполнитель, усиливая прочность и эластичность композиции, но также создают внутренние напряжения, приводящие к микро-разломам. В данном составе битум создает «барьер» для проникновения воды.

Для подтверждения данной гипотезы в лаборатории было изготовлено три партии образцов со следующим составом: грунт, цемент (10%), вода, битум (7%), пластик. В составах варьировалось наличие пластиковых частиц: 3, 5 и 7%. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Внешний вид образцов идентичен образцу (рис. 1, б), понижение прочности в сравнении с предыдущими составами составило 120%. При визуальном осмотре было выявлено, что в составах с 7 и 10% пластика адгезия между грунтом и пластиком минимальная, что оказывают негативное влияние на состав. На основании этого требуется провести повторные испытания материала с меньшим содержанием пластиковых частиц.

Практическая значимость исследования полученных результатов заключается в повышении длительной водостойкости и несущей способности слоев основания дорожных одежд. Проведенное исследование показало, что оба типа битума – вязкий и разжиженный – обладают своими преимуществами и недостатками при укреплении грунтов дорожной одежды. Однако, исходя из полученных данных, разжиженный битум продемонстрировал лучшие показатели по прочностным характеристикам.

Во-первых, разжиженный битум оказался более эффективным в суровом климате и сложных геологических условиях. Его способность легко проникать в поры грунта и заполнять микротрещины позволила создать более прочный материал для устройства основания дорожных одежд.

Во-вторых, разжиженный битум показал лучшую адаптацию к суглинку. Его способность глубоко проникать в поры и микротрещины суглинка обеспечила создание более прочного и устойчивого основания для дорожного покрытия. Это свойство сделало разжиженный битум оптимальным выбором для районов с преобладанием суглинистых грунтов, что позволило значительно сократить время и затраты на подготовку грунтов перед созданием дорожной конструкции. Однако стоит отметить, что выбор типа битума должен осуществляться индивидуально для каждого проекта, с учетом конкретных условий строительства и эксплуатации. Данные аргументы позволяют сделать вывод о том, что разжиженный битум является перспективным материалом для укрепления грунтов дорожной одежды, особенно в суровом климате и сложных геологических условиях, но для достижения поставленных целей требуется провести ряд опытов и доработать состав. Только в случае успешного завершения эксперимента его использование позволит достичь лучших показателей стабилизации водно-теплового режима, обеспечивая долговечность и безопасность автомобильных дорог.

Проводимые исследования были поддержаны в конкурсе научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» в 2024 г. (1.24-ТОГУ).

Таблица 4

Результаты испытаний укрепленного грунта

Параметры	Образцы						
	Грунт, цемент (10%), вода, разжиженный битум (7%), пластик (3%)						
Разрушающая нагрузка, кН	2,55	3,94	4,07	2,75	2,90	3,21	3,17
Поверхностная плотность ρ , г/см ³	1,817	1,807	1,798	1,794	1,827	1,780	1,781
Предел прочности, МПа	1,275	1,97	2,035	1,375	1,45	1,605	1,585
	Среднее 1,61						
Грунт, цемент (10%), вода, разжиженный битум (7%), пластик (5%)							
Разрушающая нагрузка, кН	2,07	2,66	1,28	2,22	2,33	2,69	2,17
Поверхностная плотность ρ , г/см ³	1,752	1,758	1,725	1,740	1,749	1,762	1,752
Предел прочности, МПа	1,035	1,330	0,640	1,110	1,165	1,345	1,085
	Среднее 1,101						
Грунт, цемент (10%), вода, разжиженный битум (7%), пластик (7%)							
Разрушающая нагрузка, кН	2,07	2,17	2,65	2,6	1,55	2,25	2,18
Поверхностная плотность ρ , г/см ³	1,808	1,768	1,763	1,729	1,700	55,9	56,1
Предел прочности, МПа	1,035	1,085	1,325	1,300	0,775	195,23	196,1
	Среднее 1,105						

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Укрепление дорожных грунтов битумной эмульсией / П.А. Лыщик, Е.И. Бавбель, А.И. Науменко, М.В. Цвирко // Труды БГТУ. Серия 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 2(210). С. 168–173.
2. Марков Л.А. Улучшение свойств грунтов поверхностно-активными и структурообразующими веществами. Москва : Автотрансиздат, 1963. 176 с.
3. Шуваев А.Н., Панова М.В. Надежность и долговечность автомобильных дорог в сложных природных условиях // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог : сборник научных трудов ОАО Гипродорнии. 2013. № 4(63). С. 14–19.
4. Использование геосинтетических материалов для улучшения водно-теплового режима автомобильных дорог / А.И. Ярмолинский, В.В. Лопашук, А.В. Лопашук, В.С. Светенюк // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения : международный сборник научных трудов. Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2013. С. 87–92.
5. Безрук В.М. Укрепление грунтов в дорожном и аэродромном строительстве. Москва : Транспорт, 1971. 247 с.
6. Кочеткова Р.Г., Коновалова Н.А., Дабизжа О.Н. Современные методы улучшения свойств глинистых грунтов вяжущими и добавками. Москва : Изд-во МАДИ, 2014. 132 с.
7. Егоров Г.В., Андреева А.В., Буренина О.Н. Укрепление местных грунтов стабилизатором при строительстве автомобильных дорог в условиях Севера // Дороги и мосты. 2013. № 1. С. 21–28.
8. Бабаскин Ю.Г. Дорожное грунтоведение и механика земляного полотна. Минск : Новое знание, 2013. 466 с.
9. Павликов А.Б., Каменчуков А.В. Эффективность применения добавок для модификации грунтов // Транспортные сооружения. 2024. Т. 11. № 3. С. 1–19. doi:10.15862/15SATS324

REFERENCES

1. Lyshchik P.A., Bavbel' E.I., Naumenko A.I., Cvirko M.V. Ukreplenie dorozhnyh gruntov bitumnoj emul'siej [Strengthening of road soils with bitumen emulsion] // Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe hozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемых resursov. 2018. № 2(210). S. 168-173.
2. Markov L.A. Uluchshenie svojstv gruntov poverhnostno-aktivnymi i strukturoobrazuyushchimi veshchestvami [Improvement of soil properties by surfactants and structure-forming substances]. Moskva : Izd-vo Avtotransizdat, 1963. 176 s.
3. Shuvaev A.N., Panova M.V. Nadezhnost' i dolgovechnost' avtomobil'nyh dorog v slozhnyh prirodnyh usloviyah [Reliability and durability of highways in difficult natural conditions] // Aktual'nye voprosy proektirovaniya avtomobil'nyh dorog. Sbornik nauchnyh trudov ОАО GiproDornii. 2013. № 4(63). S. 14-19.
4. Yarmolinskij A.I., Lopashuk V.V., Lopashuk A.V., Svetenok V.S. Ispol'zovanie geosinteticheskikh materialov dlya uluchsheniya vodno-teplovogo rezhima avtomobil'nyh dorog [The use of geosynthetic materials to improve the water-thermal regime of highways] // Dal'nij vostok. avtomobil'nye dorogi i bezopasnost' dvizheniya : mezhdunarodnyj sbornik nauchnyh trudov, Khabarovsk, Izd-vo TOGU, 2013, S. 87-92.
5. Bezruk V.M. Ukreplenie gruntov v dorozhnom i aerodromnom stroitel'stve [Soil reinforcement in road and airfield construction]. Moskva : Izd-vo «Transport», 1971. 247 s.
6. Kochetkova R.G., Konovalova N. A., Dabizha O. N. Sovremennyye metody uluchsheniya svojstv glinistykh gruntov vyazhushchimi i dobavkami [Modern methods of improving the properties of clay soils with binders and additives]. Moskva : Izd-vo MADI, 2014. 132 s.
7. Egorov G.V., Andreeva A.V., Burenina O.N. Ukreplenie mestnyh gruntov stabilizatorom pri stroitel'stve avtomobil'nyh dorog v usloviyah Severa [Strengthening of local soils with a stabilizer during the construction of highways in the conditions of the North] // Dorogi i mosty. 2013. № 1. S. 21-28.
8. Babaskin Y.G. Dorozhnoe gruntovedenie i mekhanika zemlyanogo polotna [Road soil science and mechanics of the roadbed]. Minsk : Izd-vo Novoe znanie, 2013. 466 s.
9. Pavlikov A.B., Kamenchukov A.V. Effektivnost' primeneniya dobavok dlya modifikacii gruntov [The effectiveness of additives for soil modification] // Transportnye sooruzheniya. 2024. T. 11. № 3. S. 1-19. DOI 10.15862/15SATS324.

Информация об авторах

А.Б. Павликов – аспирант, преподаватель Высшей школы транспортного строительства, геодезии и землеустройства;
А.В. Каменчуков – кандидат технических наук, доцент Высшей школы транспортного строительства, геодезии и землеустройства.

Information about the authors

A.B. Pavlikov – post-graduate student, lecturer Higher School of Transport Construction, Geodesy and Land Management;
A.V. Kamenchukov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor Head of the Higher School of Transport Construction, Geodesy and Land Management.

Статья поступила в редакцию 13.05.2025; одобрена после рецензирования 06.06.2025; принята к публикации 06.06.2025.
The article was submitted: 13.05.2025; approved after reviewing: 06.06.2025; accepted for publication: 06.06.2025.

Научная статья
УДК 656.02
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-65-70

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА. УПОРЯДОЧИВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЯХ

Пугачев Игорь Николаевич^{1,2}, Казарбин Алексей Владимирович³

¹ Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия

² Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия, pugachev64@mail.ru

³ Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия, kazarbin@rambler.ru

Аннотация. В апреле 2025 г. подготовлена первая редакция Концепции научно-технологического развития транспортного комплекса Российской Федерации. В данной статье рассмотрены задачи, стоящие перед транспортной отраслью, вызовы имеющихся рисков в реализации Концепции. Описана роль Российской академии наук в решении фундаментальных научных проблем и научной экспертизе в сфере транспорта. Выделены основные приоритетные направления научно-технологического развития транспортного комплекса, а также ключевые комплексные, системные, взаимосвязанные задачи для достижения поставленных целей.

Отдельно рассмотрен транспорт городских агломераций как сложная система, связывающая населённые пункты агломерации и транспортные системы населённых пунктов. Описаны проблемы транспортных систем городских агломераций и пути их решения. Обоснована возможность упорядочивания процессов транспортного планирования в городских агломерациях, с учетом требований федерального законодательства и участия регионов в национальных проектах.

Сделан вывод, что эффективный, современный транспортный комплекс может стать «локомотивом» российской экономики, способствовать созданию условий для инновационного развития страны.

Ключевые слова: Концепция научно-технологического развития транспортного комплекса РФ, Российская академия наук, городские агломерации, транспортное планирование, пассажирский транспорт

Original article

PRIORITY DIRECTIONS OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT COMPLEX. STRENGTHENING THE PROCESSES OF TRANSPORT PLANNING IN URBAN AGGLOMERATIONS

Pugachev Igor N.¹, Kazarbin Aleksey V.²

¹ Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS, Khabarovsk, Russia

² Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, pugachev64@mail.ru

³ Pacific National University, Khabarovsk, Russia, kazarbin@rambler.ru

Abstract. In April 2025, the first edition of the Concept of Scientific and Technological Development of the Transport Complex of the Russian Federation was prepared. This article considers the tasks facing the transport industry, the challenges of existing risks in the implementation of the Concept. The role of the Russian Academy of Sciences in solving fundamental scientific problems and scientific expertise in the field of transport is considered. The main priority areas of scientific and technological development of the transport complex, as well as key complex, systemic, interrelated tasks for achieving the set goals are highlighted.

Transport of urban agglomerations is singled out separately as a complex system connecting the settlements of the agglomeration and the transport systems of settlements. The problems of transport systems of urban agglomerations and ways to solve them are described. The possibility of streamlining the processes of transport planning in urban agglomerations is substantiated, taking into account the requirements of federal legislation and the participation of regions in national projects.

It is concluded that an effective, modern transport complex can become the «locomotive» of the Russian economy, contribute to the creation of conditions for the innovative development of the country.

Keywords: concept of scientific and technological development of the transport complex of the Russian Federation; Russian Academy of Sciences; urban agglomerations, transport planning, passenger transport

Транспортная отрасль является наиболее сложным, трудоемким, затратным и одновременно наиболее эффективным звеном развития экономики любого государства.

В апреле 2025 г. научно-техническим советом по научно-технологическому развитию транспортной отрасли Минтранса РФ подготовлена первая редакция Концепции научно-технологического развития

транспортного комплекса Российской Федерации. Основной целью научно-технологического развития транспортного комплекса на период до 2035 г. обозначено обеспечение технологического суверенитета, научно-технологического развития и технологического лидерства транспортного комплекса в целях эффективной реализации национальных проектов и задач Транспортной стратегии [1–3].

Национальные проекты «Эффективная транспортная система», «Инфраструктура для жизни», иные сопряженные с развитием транспортного комплекса национальные проекты, Транспортная стратегия до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. ставят задачи опережающего развития транспортной инфраструктуры, роста мощности инфраструктуры Единой опорной транспортной сети Российской Федерации, строительства и модернизации сети автомобильных дорог, ввода в строй модернизированных аэродромных комплексов, спуска на воду новых судов. Документами стратегического планирования предусмотрены, в частности, комплексная цифровизация транспортных процессов, развитие зрелых технологий, разработка и внедрение новых высоких технологий, в том числе адаптация сквозных технологий для транспортного комплекса, создание системных платформенных решений. Кроме этого, возрастает роль сквозных транспортных технологий (применимых при условии адаптации) для различных видов транспорта, технологий транспортных мезосистем (агломерационных, региональных, коридоров мультимодальных перевозок).

Среди целого ряда вызовов имеющих риски в реализации Концепции следует выделить риски дефицита трудовых ресурсов в условиях демографического перехода при отсутствии разработок новых малолюдных технологий, а также необходимость эффективного освоения и использования пространства, в том числе путем преодоления диспропорций в социально-экономическом развитии территории страны. Укрепление позиций России в области экономического и научного освоения космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики определяет системный вызов в сфере развития опорной транспортной сети, международных транспортных коридоров, проходящих по территории Российской Федерации [4–5].

Большая роль в научном развитии транспортной отрасли отводится Российской академии наук (РАН). В числе специфических больших вызовов для научно-технологического развития транспортного комплекса следует выделить отсутствие в настоящее время секции в РАН, специализирующейся на рассмотрении фундаментальных научных проблем и научной экспертизе в сфере транспорта. С 1965 по 1974 г. в РАН действовала постоянная комиссия по научным проблемам развития транспорта.

В разные периоды уже современной истории создавались Совет РАН по инновационным проблемам транспорта и логистики и научный совет РАН по транспорту (упразднены Постановлением Президиума РАН № 92 от 20 мая 2025 г.). В 2023 г. при Отделении наук о Земле Российской академии наук был создан действующий в настоящее время Научный совет «Окружающая среда и транспорт» – основная экспертная структура в сфере транспорта.

Однако отсутствие отдельной секции в РАН приводит к целому ряду существующих проблем:

- отсутствию сформированного и закрепленного, в том числе в нормативных правовых актах, понятия «транспортная наука» и ее производных (транспортные технические науки, транспортное право и т.д.);

- отсутствию выделенной номенклатуры направлений фундаментальных научных исследований в сфере транспорта;

- отсутствию в транспортном комплексе уникальных научных установок;

- недопредставленности направления транспортных научных исследований в деятельности международных объединений дружественных стран;

- отсутствию выделения отдельной широкой области транспортных наук, формирующейся ввиду фактической междисциплинарности большинства исследований, что приводит к вынужденному распределению научных публикаций по журналам, представляющим различные научные дисциплины, тем самым снижается их узнаваемость и цитируемость;

- отсутствию механизмов, исключающих дублирование тематики научной деятельности в подведомственных и отраслевых организациях, обеспечивающих преемственность исследований;

- неравномерности распределения научного потенциала и опыта ведения научных исследований в региональном плане и по видам транспортной деятельности;

- малой доле исследований в областях фундаментальных знаний (в 2023 г. в количественном плане подведомственными образовательными организациями было выполнено 88 фундаментальных исследований и 1291 прикладное).

Все вышесказанное указывает на необходимость создания в составе Российской академии наук секции по проблемам транспорта для обеспечения научной координации и экспертизы фундаментальных исследований в области транспорта.

Среди основных приоритетных направлений научно-технологического развития транспортного комплекса следует выделить развитие цифровых технологий: технологий интеллектуального управления (включая предиктивную аналитику транспортных потоков и мониторинг) транспортными мега- и мезотранспортными системами (на уровне страны, транспортных коридоров, бесшовных

маршрутных перевозок, агломерационных и региональных транспортных систем); интеллектуальных систем управления и передачи данных в транспортных системах; применения нейронных сетей в задачах, связанных с управлением и обеспечением безопасности движения транспортных средств; мониторинга, оценки и прогноза влияния природных факторов на объекты транспортной инфраструктуры и эксплуатацию транспортных средств; оценки и математического обоснования производительности алгоритмов управления потоками данных в режиме реального времени [6–14].

Для достижения цели научно-технологического развития транспортного комплекса ставится задача решить ключевые комплексные, системные, взаимосвязанные проблемы:

а) обеспечить формирование интегрированной повестки научно-технологического развития транспортного комплекса с выделением приоритетных направлений, технологий технологического суверенитета и технологического лидерства;

б) создать, по аналогии с обеспечением транспортной связанности территории страны и развитием опорной транспортной сети, опорную сеть ведения транспортных научных исследований, обеспечить их связанность, доступность по критически важным и технологически значимым направлениям транспортной деятельности;

в) способствовать укреплению статуса подведомственных и отраслевых организаций как центров генерации технологических инициатив и новых знаний;

г) развивать единое отраслевое научно-технологическое пространство, ориентированное на решение государственных задач и удовлетворение потребностей транспортного комплекса;

д) укрепить в условиях нового технологического уклада роль транспортного ученого и инженера как лидера технологических изменений.

Обеспечение формирования интегрированной повестки научно-технологического развития транспортного комплекса позволит обеспечить методологическое и методическое обеспечение проведения научной (научно-технической) экспертизы на различных стадиях подготовки и реализации научных, научно-технических программ и проектов при участии Российской академии наук с учетом установленных законодательством Российской Федерации особенностей проведения такой экспертизы на разных уровнях готовности технологий.

Создание опорной сети ведения транспортных научных исследований позволит: создать отраслевую экосистему проведения научных исследований и разработок, внедрения наукоемких технологий, отвечающую современным принципам организации научной, научно-технической и инновационной деятельности, на основе лучших российских и

мировых практик; организовать сеть центров транспортных компетенций; обеспечить сохранение и развитие интеллектуального потенциала транспортной науки; сформировать систему научной (научно-технической) экспертизы.

Говоря о научно-технологическом развитии транспортного комплекса страны, отдельно следует остановиться на транспорте городских агломераций, представляющем собой сложную систему, связывающую населённые пункты агломерации и транспортные системы этих населённых пунктов. Она включает различные виды транспорта: автомобильный, трамвай, метро, пригородные поезда и др. Городские агломерации становятся доминирующей формой расселения, компактным территориальным объединением населённых пунктов, где существуют интенсивные связи в виде ежедневных трудовых миграций и совместного использования транспортной инфраструктуры. В последнее время развитие городских агломераций стали почти повсеместно связывать с процессом урбанизации [15–20].

Основные функции транспорта в городской агломерации:

– удовлетворение потребностей населения в перевозках (трудовых, культурно-бытовых, пригородных и междугородних);

– обеспечение связности элементов агломерации (транспорт связывает город-центр с поселениями-спутниками и пригородной зоной).

Также следует выделить проблемы транспортных систем городских агломераций, требующих эффективных путей их решения:

– загруженность транспортной сети из-за постоянного перемещения населения. Решение данной проблемы лежит в оптимизации маршрутной сети, реконструкции инфраструктуры, обновлении подвижного состава;

– недостаточная эффективность использования ресурсов пассажирского транспортного комплекса. Основной путь решения – формирование бесшовных транспортных систем на базе логистических принципов, где минимизируется время на ожидание транспорта и пересадку;

– снижение уровня транспортной безопасности. Здесь основное решение – развитие транспортно-пересадочных узлов, включение личного транспорта и форм совместного потребления в транспортные системы агломераций.

Один из примеров может служить транспортная система города Хабаровска, включающая рельсовый транспорт (трамвай и пригородное железнодорожное сообщение), автобусное и троллейбусное движение, которые дополняются такси, каршерингом и сервисом аренды велосипедов и самокатов [21].

Несмотря на многочисленные работы о взаимодействии транспортной инфраструктуры и расселе-

ния за почти полувековой опыт исследований, все еще ощущается недостаток в четких закономерностях взаимообусловленного развития.

Транспортная инфраструктура позволяет выстроить новые взаимодействия элементов городской системы. Определяющим компонентом в этих процессах становится население. Оно обеспечивает производство трудовыми ресурсами, формирует спрос для рынка, становится показателем транспортной инфраструктуры за счет своей мобильности.

При этом следует отметить, что взаимодействие транспортной инфраструктуры и населения имеет большое значение лишь в границах городской агломерации. В ее пределах определяющими работу транспорта являются главные пользователи – пассажиропотоки, обладающие наибольшей интенсивностью.

Взаимное развитие транспорта и расселения отличается сложностью, так как находится под действием множества факторов. Темпы их развития также различны. Для нормального стадийного развития агломерации транспортная система городского поселения должна развиваться опережающими темпами.

Возможность упорядочивания процессов транспортного планирования в городских агломерациях, с учетом требований федерального законодательства и участия регионов в национальных проектах, остается актуальным вопросом. Необходим качественный переход к единой организационной структуре управления транспортными системами и цифровым транспортным комплексом страны, региона, городской агломерации для эффективного развития транспорта в соответствии с ведомственным проектом Минтранса РФ «Научные исследования и цифровизация в сфере дорожного хозяйства» в составе национального проекта «Эффективная транспортная система» в связи со Стратегией пространственного развития страны на период до 2030 г., основу которой составляют транспортные инфраструктуры по видам транспорта, обеспечивающие связность территорий и требующие цифровизации и интеграции в одну экосистему цифровых сервисов, как по отдельным видам транспорта, так и в совокупности по типу «одного окна» для всех участников транспортного процесса.

Следует констатировать, что в настоящий момент существующие документы транспортного планирования агломераций и субъектов Российской Федерации выполнены разными подрядчиками без увязки в единой информационной системе мероприятий по развитию транспортной инфраструктуры во времени и пространстве, которая могла бы являться неким базисом для разработки совместных мероприятий соседствующих субъектов Российской Федерации, обеспечивая тем самым связность территории Российской Федерации и синхронизируя разработку документов транспортного планирования для регионов.

В настоящее время существуют предпосылки и возможности реализации для разработки на государственном уровне и запуска информационной системы, содержащей увязку во времени и пространстве данных по мероприятиям, для формирования единой базы и разработки последующих мероприятий, с учетом существующих в регионах видов транспорта [28–33]. Это позволит создать сквозную концепцию развития стратегической транспортной инфраструктуры для всех регионов, тем самым обеспечив связность территории Российской Федерации и качественный рывок в создании интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также даст возможность занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем.

Транспортные системы уже в ближайшем будущем станут основой для развития доступных, дешевых, безопасных, оперативных и предсказуемых транспортных связей как на региональном, так и на международном уровне. Совершенствование транспортных коммуникаций обеспечит эффект «сжатия пространства», т.е. субъективное сокращение расстояний между населенными пунктами и различными территориями для потребителей транспортных услуг. Достижение подобного социально-экономического эффекта тесно связано с проведением целого ряда прикладных исследований по всему транспортному комплексу.

Прежде всего, следует существенно повысить эффективность транспортного планирования путем формирования транспортно-экономического баланса и внедрения современных методов моделирования. Рост доступности и качества услуг, эффективной скорости и устойчивости транспортного сообщения в условиях напряженного движения в настоящее время является серьезным вызовом, ответ на который возможен только на базе нового поколения транспортных технологий. Еще один вызов, связанный с организацией скоростного и высокоскоростного движения, – это необходимость повышения уровня мобильности населения, что было отмечено в Послании Президента Российской Федерации Федеральному Собранию Российской Федерации 12 декабря 2012 г.

Эффективный, современный транспортный комплекс может стать «локомотивом» российской экономики, способствовать созданию условий для инновационного развития страны, но его формирование требует привлечения значительных финансовых ресурсов, которые не могут быть получены только на базе федерального бюджета. Следовательно, ключевым экономическим вызовом для транспортного сектора становится повышение инвестиционной привлекательности, а это может быть достигнуто за счет снижения затрат, повышения эффективности строительства и содержания объектов инфраструктуры, роста производительности труда

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пугачев И.Н. Проблемы модернизации транспортных систем городов // Транспортное строительство. 2008. № 8. С. 5–9.
2. Пугачёв И.Н., Куликов Ю.И., Балалаев А.С. Стратегия развития транспортных коридоров России / под ред. Ю.И. Куликова. Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2014. 243 с.
3. Pugachev I., Kamenchukov A., Yarmolinsky V. Evaluation of road repair efficiency in terms of ensuring traffic quality and safety // Transportation Research Procedia 36, Thirteenth International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities (SPbOTSIC 2018). Pp. 627–633.
4. Пугачёв И.Н., Шешера Н.Г. Исследование дорожной обстановки в местах свершения ДТП с позиций травматизма // Автотранспортное предприятие. 2015. № 7. С. 43–46.
5. Пугачев И.Н., Куликов Ю.И. Формирование транспортно-логистических кластеров как механизм интеграции России со странами АТР // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 2(39). С. 17–19. EDN: PAOANH.
6. Куликов Ю.И., Пугачев И.Н. Интерактивные методы обучения студентов по дисциплинам профессионального цикла // Проблемы высшего образования. 2013. № 1. С. 198–200. EDN: PLVOZI.
7. Пугачев И.Н., Скрипка П.Б., Шешера Н.Г. Программный подход к комплексному сбору и подготовки данных об интенсивности движения транспортных средств, погодных условий и естественной освещенности в часовых интервалах // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 10. С. 43–51.
8. Пугачев И.Н., Шешера Н.Г., Григоров Д.Е. Определение эффективных широт интервалов влияния температурных режимов на интенсивность транспортного потока с использованием ранговой корреляции Спирмена // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18, № 3. С. 34–40.
9. Прогноз интенсивности транспортного потока. Обучение с учителем. Метод случайных деревьев / И.Н. Пугачев, С.С. Евтюков, Н.Г. Шешера, Д.Е. Григоров // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18, № 4. С. 36–47.
10. Пугачев И.Н., Маркелов Г.Я., Бурков С.М. Формирование ИТС. Методика исследования инфраструктуры на примере города Хабаровска / под ред. С.М. Буркова. Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2013. 126 с.
11. Комплексный подход к повышению безопасности дорожного движения на основе анализа транспортно-эксплуатационного состояния автомобильной дороги / И.Н. Пугачёв, А.В. Каменчуков, В.А. Ярмолинский, Н.Г. Шешера // Дороги и мосты. 2018. № 1(39). С. 21.
12. Factor Analysis of Traffic Organization and Safety Systems / I. Pugachev, Y. Kulikov, G. Markelov, N. Sheshera // Organization and Traffic Safety Management in large cities : 12th International Conference, SPbOTSIC-2016, 28–30 September 2016, St. Petersburg. St. Petersburg, 2017. Pp. 529–535.
13. Пугачев И.Н., Шешера Н.Г., Щеглов В.И. Анализ геометрических элементов дорог с помощью современных геоинформационных систем при оценке их аварийности // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 3 (86). С. 127–133.
14. Пугачев И.Н., Шешера Н.Г., Григоров Д.Е. Совершенствование системы безопасности дорожного движения, стремящейся к нулевой смертности на автомобильных дорогах : монография. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2024. 183 с.
15. Пугачев И.Н., Пегин П.А. Дорожная и психофизиологическая экспертиза дорожно-транспортных происшествий : учебное пособие. Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2008. 106 с.
16. Glaeser E.L., Gottlieb J.D. The Wealth Of Cities: Agglomeration Economies And Spatial Equilibrium In The United States // National Bureau Of Economic Research. Cambridge, 2009. 76 p.
17. Бозе Э. Городская агломерация: старое название – новое содержание // Российское экспертное обозрение. Удобное пространство города. 2007. № 4–5(22). С. 13–16.
18. Перцик Е.Н. Крупные городские агломерации: развитие, проблемы проектирования // Проблемы развития агломераций России. Москва : Красанд, 2009. С. 34–46.
19. Кельбах В.С. Транспортная инфраструктура как элемент городской агломерации // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2013. Вып. 2. С. 135–144.
20. Колоскова А.А. Проблемы и перспективы формирования агломераций на территории Российской Федерации // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2021. № 10-1. С. 34–40. EDN: YHQFNL. doi:10.17513/vaael.1866
21. Одицова А.В. Проблемы развития агломераций в России // Федерализм. 2021. Т. 26, № 2(102). С. 65–83. EDN: APNSYR. doi:10.21686/2073-1051-2021-2-65-83
22. Пугачёв И.Н., Володькин П.П. Прогнозирование развития системы городского пассажирского транспорта в условиях крупного города // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2010. № 1(16). С. 91–98. EDN: LKDRWL.

REFERENCES

1. Pugachev I.N. Problemy modernizatsii transportnyh sistem gorodov [Problems of modernization of urban transport systems] // Transportnoe stroitel'stvo. 2008. № 8. S. 5–9.
2. Pugachev I.N., Kulikov Yu.I., Balalaev A.S. Strategiya ravitiya transportnyh koridorov Rossii [Strategy for the development of transport corridors of Russia] / pod red. Yu.I. Kulikova. Khabarovsk : Izd-vo TOGU, 2014. 243 s.
3. Pugachev I., Kamenchukov A., Yarmolinsky V. Evaluation of road repair efficiency in terms of ensuring traffic quality and safety // Transportation Research Procedia 36, Thirteenth International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities (SPbOTSIC 2018). Pp. 627–633.
4. Pugachev I.N., Sheshera N.G. Issledovanie dorozhnoj obstanovki v mestakh soversheniya DTP s pozitsij travmatizma [Research of the road situation in places of accidents from the standpoint of injuries] // Avtotransportnoe predpriyatie. 2015. № 7. S. 43–46.
5. Pugachev I.N., Kulikov Yu.I. Formirovanie transportno-logisticheskikh klasterov kak mehanizm integratsii Rossii so stranami ATR [Formation of transport and logistics clusters as a mechanism for integrating Russia with the Asia-Pacific countries] // Transport Rossijskoj Federatsii. 2012. № 2 (39). S. 17–19. EDN: PAOANH.

6. Kulikov Yu.I., Pugachev I.N. Interaktivnye metody obucheniya studentov po distsiplinam professional'nogo tsikla [Interactive methods of teaching students in professional disciplines] // Problemy vysshego obrazovaniya. 2013. № 1. P. 198–200. EDN: PLVOZI.
7. Pugachev I.N., Skripko P.B., Sheshera N.G. Programny podhod k kompleksnomu sboru i podgotovki dannyh ob intensivnosti dvizheniya transportnyh sredstv, pogodnyh uslovij i yestestvennoj osveshchennosti v chasovyh intervalah [Software approach to integrated collection and preparation of data on vehicle traffic intensity, weather conditions and natural light in hourly intervals] // T-Comm: Telekommunikatsii i transport. 2023. T. 17. № 10. S. 43–51.
8. Pugachev I.N., Sheshera N.G., Grigorov D.E. Opredelenie effektivnyh shirot intervalov vliyaniya temperaturnykh rezhimov na intensivnost' transportnogo potoka s ispol'zovaniem rangovoj korrelyatsii Spirmena [Determination of effective latitudes of intervals of influence of temperature conditions on traffic flow intensity using Spearman's rank correlation] // T-Comm: Telekommunikatsii i transport. 2024. T. 18. № 3. S. 34–40.
9. Prognoz intensivnosti transportnogo potoka. Obuchenie s uchitelem. Metod sluchajnyh derev'ev. [Forecasting the intensity of traffic flow. Supervised learning. Random trees method] / I.N. Pugachev, S.S. Evtyukov, N.G. Sheshera, D.E. Grigorov // T-Comm: Telekommunikatsii i transport. 2024. T. 18. № 4. S. 36–47.
10. Pugachev I.N., Markelov G.Ya., Burkov S.M. Formirovanie ITS. Metodika issledovaniya infrastruktury na primere goroda Khabarovska [Formation of ITS. Methodology for studying infrastructure using the example of the city of Khabarovsk] / pod red. S.M. Burkova. Khabarovsk : Izd-vo TOGU. 2013. 126 s.
11. Kompleksny podkhod k povysheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na osnove analiza transportno-ekspluatatsionnogo sostoyaniya avtomobil'noj dorogi [An integrated approach to improving road safety based on the analysis of the transport and operational condition of the road] / I.N. Pugachev, A.V. Kamenchukov, V.A. Yarmolinsky, N.G. Sheshera // Dorogi i mosty. 2018. № 1(39). S. 21.
12. Factor Analysis of Traffic Organization and Safety Systems / I. Pugachev, Y. Kulikov, G. Markelov, N. Sheshera // 12th International Conference «Organization and Traffic Safety Management in large cities», SPbOTSIC-2016, 28-30 September 2016, St. Petersburg. St. Petersburg, 2017. P. 529–535.
13. Pugachev I.N., Sheshera N.G., Shcheglov V.I. Analiz geometricheskikh elementov dorog s pomoshchyu sovremennykh geoinformatsionnyh sistem pri otsenke ih avarijnosti [Analysis of geometric elements of roads using modern geographic information systems in assessing their accident rate] // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2021. № 3 (86). S. 127–133.
14. Pugachev I.N., Sheshera N.G., Grigorov D.E. Sovershenstvovanie sistemy bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya, stremyashchejsya k nulevoj smertnosti na avtomobil'nyh dorogah [Improving the road safety system, striving for zero fatalities on roads] : monografiya. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2024. 183 s.
15. Pugachev I.N., Pegin P.A. Dorozhnaya i psihofiziologicheskaya ekspertiza dorozhno-transportnyh proishestvij [Road and psychophysiological examination of road accidents] : uchebnoe posobie. Khabarovsk : Izd-vo TOGU, 2008. 106 p.
16. Glaeser E.L., Gottlieb J.D. The Wealth Of Cities: Agglomeration Economies And Spatial Equilibrium In The United States // National Bureau Of Economic Research. Cambridge, 2009. 76 p.
17. Bose E. Gorodskaya aglomeratsiya: staroe nazvanie – novoe sodержanie [Urban agglomeration: old name – new content] // Rossijskoe ekspertnoe obozrenie. Udobnoe prostranstvo goroda. 2007. № 4-5 (22). S. 13–16.
18. Pertsik E.N. Krupnye gorodskie aglomeratsii: razvitie, problemy proektirovaniya [Large urban agglomerations: development, design problems] // Problemy razvitiya aglomeratsij v Rossii. Moskva : Krasand, 2009. S. 34–46.
19. Kelbakh V.S. Transportnaya infrastruktura kak element gorodskoj aglomeratsii [Transport infrastructure as an element of urban agglomeration] // Vestnik SPbGU. Ser. 7. 2013. Vyp. 2. S. 135–144.
20. Koloskova A.A. Problemy i pespektivy formirovaniya aglomeratsij na territorii Rossijskoj Federatsii [Problems and prospects of formation of agglomerations on the territory of the Russian Federation] Vestnik Altajskoj Akademii ekonomiki i prava. 2021. № 10-1. S. 34–40. EDN: YHQFNL. doi:10.17513/vaael.1866
21. Odintsova A.V. Problemy razvitiya aglomeratsij v Rossii [Problems of agglomeration development in Russia] // Federalizm. 2021. T. 26, № 2(102). S. 65–83. EDN: APNSYR. doi:10.21686/2073-1051-2021-2-65-83
22. Pugachev I.N., Volodkin P.P. Prognozirovanie razvitiya sistemy gorodskogo passazhirskogo transporta v usloviyah krupnogo goroda [Forecasting the development of the urban passenger transport system in a large city] // Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. 2010. № 1 (16). S. 91–98. EDN: LKDRWL.

Информация об авторах

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

А.В. Казарбин – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы физико-математических наук.

Information about the authors

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

A.V. Kazarbin – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Higher School of Physical and Mathematical Sciences of PNU.

Статья поступила в редакцию 05.06.2025; одобрена после рецензирования 25.06.2025; принята к публикации 25.06.2025.
The article was submitted: 13.05.2025; approved after reviewing: 06.06.2025; accepted for publication: 06.06.2025.

Научная статья
УДК 621.311
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-71-77

ПЕРСПЕКТИВНОЕ РАЗВИТИЕ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ РЕГИОНОВ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

Рамазанова Эльмира Айдыновна¹, Игнатенко Иван Владимирович²,
Власенко Сергей Анатольевич³

¹ Филиал АО «СО ЕЭС» Тихоокеанское РДУ, Хабаровск, Россия, sabina.elmira@mail.ru

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

² eao79@yandex.ru

³ vsa_ens@mail.ru

Аннотация. Электроэнергетика занимает ключевое место в обеспечении энергетической безопасности и устойчивого развития государства, что определяет необходимость государственного контроля над инвестициями в данную отрасль. Важность совмещения стратегии разработки схемы развития электроэнергетических систем, размещения объектов генерации, перспектив развития промышленного производства и удовлетворения спроса в электрической энергии является стратегической задачей государственной политики в области экономического развития Дальнего Востока. Выделение основных элементов и понимание взаимозависимости между ними, а также определение требуемых своевременных мероприятий со стороны регулятора требуют нормативно-технического обеспечения на длительный период. Предмет исследования – существующее состояние и перспективы энергопотребления регионов Дальнего Востока и определение основного направления удовлетворения энергодефицита в локальных местах или решение проблемы комплексно. Выявлены отдельные регионы с профицитом генерирующих мощностей на долгосрочный период и энергодефицитные районы, требующие принятия срочного решения по вводу генерирующих мощностей. Предложено использование плавучих энергетических блоков в прибрежных районах для покрытия дефицита активной мощности, которые в кратчайшие сроки по сравнению со строительством традиционной генерации позволят решить проблему баланса на длительный период времени, с использованием современных и безопасных ядерных технологий отечественного производителя.

Ключевые слова: энергосистема, энергопотребление, мощность, Дальний Восток

Original article

PROSPECTIVE DEVELOPMENT OF POWER SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF THE FAR EASTERN FEDERAL DISTRICT REGIONS

Ramazanova Elmira A.¹, Ignatenko Ivan V.², Vlasenko Sergey A.³

¹ Branch of JSC 'SEE' Pacific RDU, Khabarovsk, Russia, sabina.elmira@mail.ru

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

² eao79@yandex.ru

³ vsa_ens@mail.ru

Abstract. Electric power industry occupies a key place in ensuring energy security and sustainable development of the state, which determines the need for state control over investments in this industry. The importance of combining the strategy for working-out the development scheme of electric power systems, the placement of generation objects, the prospects for the development of industrial production and the satisfaction of demand in electric energy is a strategic task of the state policy in the field of economic development of the Far East. The allocation of the main elements and the understanding of the interdependence between them, as well as the determination of the required timely measures by the regulator require regulatory and technical support for a long period. The subject of the study is the existing state and prospects for the energy consumption of the regions of the Far East and the determination of the main direction of satisfaction of the energy deficit in local places or a comprehensive solution to the problem. Separate regions with a surplus of generating capacities for the long-term period and energy deficiency areas have been identified, requiring an urgent decision on the input of generating capacities. The use of floating energy blocks in coastal areas was proposed to cover active capacity deficits, which in the shortest possible time compared to the construction of traditional generation will solve the balance problem for a long period of time, using modern and safe nuclear technologies of the domestic manufacturer.

Keywords: energy system, energy consumption, power, the Far East

Электроэнергетика занимает ключевое место в энергетической безопасности и устойчивого развития государства, что определяет необходимость государственного контроля над инвестициями в данную отрасль. Основная цель регуляторной политики заключается в создании сбалансированной модели взаимодействия между публичным и частным сектором,

направленной на повышение экономической результативности энергосистемы [1].

Современная российская энергетика сочетает конкурентные и монопольные сегменты, каждый из которых имеет уникальные механизмы финансирования. В сфере генерации, функционирующей в условиях рыночной конкуренции, инвестицион-

ные решения компаний зависят от потребительского спроса. Однако текущие рыночные цены недостаточны для реализации масштабных проектов по строительству и модернизации объектов генерации.

Государственное регулирование инвестиций в электроэнергетику базируется на утверждении стратегических программ развития отрасли, которые служат основанием для согласования инвестиционных проектов регуляторами. Объекты, не включенные в такие программы, могут реализовываться либо за счёт средств, полученных через плату за технологическое присоединение, либо через прямое бюджетное финансирование, однако, последнее в энергетике применяется крайне редко.

Ключевой особенностью инвестиций в электросетевой комплекс является отсутствие новых участников рынка: проекты направлены на оптимизацию подключения потребителей через действующих операторов, среди которых доминирует государственная компания ПАО «Россети». Отдельный сегмент – привлечение частного капитала в муниципальные сети через концессионные соглашения. Однако жесткие требования к операторам и низкая доходность этого сектора способствуют поглощению активов крупными игроками, что усиливает концентрацию в отрасли. Таким образом, фокус частных инвестиций смещен в сферу генерации, где государство создаёт специальные рыночные механизмы поддержки. Координацию этих процессов обеспечивает Ассоциация «НП Совет Рынка», которая балансирует интересы производителей и потребителей энергии, минимизируя использование бюджетных ресурсов.

С 2024 г. вступила в силу новая система перспективного планирования в электроэнергетике. За АО «СО ЕЭС» был закреплён ряд функций, в том числе, с 01.01.2024 г. системный оператор принял функции от компаний Группы ПАО «РусГидро» по оперативно-диспетчерскому управлению в технологически изолированных энергосистемах.

Объединение усилий позволило создать обновлённую систему планирования, включающую два ключевых элемента:

- генеральную схему размещения объектов электроэнергетики – документ, актуализируемый каждые 6 лет;
- схему и программу развития электроэнергетических систем России (СиПР ЭЭС России) – ежегодно обновляемый шестилетний план.

Данная система разработана для решения следующих задач:

- оперативного реагирования на растущие потребности в энергообеспечении для поддержания экономического развития;
- обеспечения баланса между надёжностью и экономической эффективностью при выборе технических решений;
- повышения прозрачности процессов принятия решений в энергетике;
- обеспечения равного доступа к сложным прогнозным моделям и инструментам проектирования, что снижает издержки;

– реализации единой технической политики в энергосистемах страны.

Внедрение системы направлено на минимизацию затрат, оптимизацию инфраструктурных проектов и укрепление конкурентоспособности энергетического сектора через согласованные стратегические подходы. Поэтому необходимо проанализировать энергопотребление на перспективу на примере дальневосточных регионов, просчитать возможные энергодефициты, показать наличие проблем и оценить эффект от процесса перспективного планирования энергосистем.

Прогнозные балансы мощности разрабатываются по таким показателям, как максимальное потребление мощности и потребление электрической энергии в границах энергосистемы [2–4]. При формировании прогнозных балансов мощности в целях расчета покрытия потребности определяются показатели электростанций энергосистемы: установленная и располагаемая мощность.

Существует два подхода к формированию перспективных прогнозов потребления электроэнергии и мощности. Подход «снизу вверх» характеризуется детализированным прогнозом по потребителям с дальнейшим агрегированием на уровень территории. Второй подход «сверху вниз» – это прогноз потребления по стране в целом с дальнейшей детализацией по видам экономической деятельности в региональном разрезе.

За формирование перспективных прогнозов отвечает АО «СО ЕЭС», формирующее прогноз на периоды в пределах года и год, среднесрочный прогноз.

Согласно Всероссийскому совещанию об итогах прохождения отопительного сезона 2023–2024 гг. Дальний Восток является зоной с высокими рисками ввода графиков аварийного ограничения режима потребления электрической энергии (мощности).

Анализ энергетического потенциала Амурской области до 2029 г.

Строительство новых объектов генерации электрической энергии до 2029 г. в Амурской области не планируется [2]. Увеличение максимума потребления к 2029 г. составит 473 МВт, что утяжелит режим в энергосистемах Хабаровского края и ЕАО и Приморского края, а также повлияет на Якутию, от которой осуществляется транзит мощности в Амурскую область. На рис. 1 приведена диаграмма распределения мощностей.

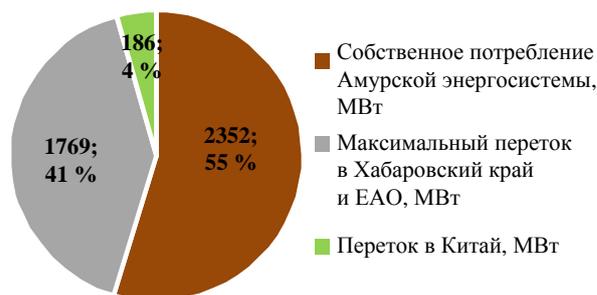


Рис. 1. Диаграмма распределения мощностей в Амурской области

В рамках выполнения второго этапа развития Восточного полигона железных дорог, инициированного ОАО «РЖД», на базе Нерюнгринской ГРЭС в энергосистеме Республики Саха (Якутия) запланировано возведение двух паросиловых энергоблоков модели К-225-12,8. Каждый из них будет обладать мощностью 225 МВт, а их ввод в эксплуатацию намечен на 2025 г. Данный проект направлен на укрепление энергетической инфраструктуры региона в соответствии со стратегией развития транспортного коридора. Баланс электрической мощности приведен на рис. 2.

В Республике Саха (Якутия) также остается открытым вопрос по замене импортных ГТУ на Якутской ГРЭС Новая, с суммарной установленной мощностью 164 МВт.

Анализ энергетического потенциала Хабаровского края и Еврейской автономной области до 2029 г.

На рис. 3 приведена динамика потребления мощности энергосистемы до 2029 г. [1].

В ходе анализа режимно-балансовых и схемно-режимных условий Хабаровского края было выявлено,

но, что существуют риски отделения на изолированный режим работы Совгаванского энергорайона из-за отключения двух воздушных линий напряжением 220 кВ, входящих в состав контролируемого сечения Селихино–Ванино (ремонтное), согласно [2]. В таком случае энергорайон будет подключен только к Совгаванской ТЭЦ, установленная мощность которой составляет 126 МВт. Как видно из рис. 4, зимний максимум в январе 2024 г. превышает 116 МВт. Таким образом, после присоединения ряда крупных потребителей, общая расчетная мощность которых составляет около 32 МВт, существует риск возникновения дефицита мощности.

Строительство новых центров генерации не запланировано [3], рассматриваются варианты развития электрической сети, но этого недостаточно для покрытия растущего потребления. Баланс мощности представлен на рис. 5.

Можно констатировать, что к 2029 г. возникнет потребность в активной мощности величиной 630 МВт. Также на о. Русский необходима замена импортных ГТУ суммарной мощностью 46 МВт.



Рис. 2. Баланс электрической мощности энергосистемы Республики Саха (Якутия)



Рис. 3. Баланс электрической мощности энергосистемы Хабаровского края и Еврейской автономной области



Рис. 4. График потребления за сечением Селихино–Ванино на зимний максимум 2024 г.



Рис. 5. Баланс электрической мощности энергосистемы Приморского края

Анализ энергетического потенциала Магаданской области до 2027 г.

Магаданская энергосистема работает изолированно, соединена двумя ВЛ напряжением 110 кВ для частичного электроснабжения Оймяконского района республики Якутия [4] и является профицитной. Установленная мощность энергосистемы составляет 1790 МВт, в то время как максимум генерации в 2023–2024 гг. достигал лишь 428 МВт (рис. 6).



Рис. 6. Баланс мощности в Магаданской энергосистеме до 2027 г.

Анализ энергетического потенциала Чукотского автономного округа до 2027 г.

В анализе учитывается Чаун-Билибинский энергорайон, в котором можно выделить сразу две особенности: наличие единственной в России плавучей атомной теплоэлектростанции имени Ломоносова (ПАТЭС) мощностью 70 МВт; Билибинская АЭС, единственная в России маломощная атомная электростанция мощностью 36 МВт.

Максимум потребления Чаун-билибинского энергоузла в 2023 г. составляет 69 МВт. Потребность в электроэнергии на данный момент полностью обеспечивается выработкой действующих электростанций, но в силу физического и мораль-

ного износа оборудования планируется вывод из эксплуатации Билибинской АЭС с декабря 2025 г., а также Чаунской ТЭЦ [6].

Баланс мощности с учетом планируемого перспективного развития представлен на рис. 7.

Анализ энергетического потенциала Камчатского края до 2027 г.

Особенностью края является наличие геотермальных электростанций, а для отдаленных районов в Камчатском крае осуществляется сезонный завоз топлива.

Баланс мощности энергосистемы до 2027 г. для умеренного варианта представлен на рис. 8 [3].

Электростанции Центрального энергоузла энергосистемы Камчатского края в период до 2027 г. обеспечивают потребность в максимальной мощности.

Анализ энергетического потенциала Сахалинской области до 2027 г.

Баланс мощности энергосистемы до 2027 г. сведен на рис. 9 [8].



Рис. 7. Баланс мощности в Чукотском автономном округе до 2027 г.



Рис. 8. Баланс мощности в Камчатской энергосистеме до 2027 г.



Рис. 9. Баланс мощности в Сахалинской энергосистеме до 2027 г.

Из доступной генерации импортные газотурбинные установки составляют 37 %, таким образом необходимо заменить 230 МВт. На данный момент осуществляется ввод в эксплуатацию двух газотурбинных установок суммарной установленной мощностью 50 МВт.

В ходе проведения перспективного анализа выявлено, что на территориях регионов Дальневосточного федерального округа в связи с ростом экономики и потребления в перспективе до 2029 г. может возникнуть дефицит электрической мощности. Было учтено снижение перетока из смежных территорий, наличие импортного оборудования, требующего замены, запланированные объекты генерации и новые потребители [5].

При расчете минимально необходимого уровня генерирующей мощности для покрытия дефицитов активной мощности в отдельных энергорайонах ОЭС Востока требуется учитывать следующие аспекты.

1. Прогнозируемый рост нагрузки: планы подключения новых и увеличения нагрузки действующих потребителей на перспективный период.

2. Повышение надежности энергосистемы: необходимость обеспечения балансовой надежности энергоснабжения.

3. Локализация дефицитов мощности в ключевых зонах:

- центральный энергорайон Республики Саха (Якутия) за КС «Гоммот–Майя»;
- южная часть энергосистемы Приморского края за КС «ПримГРЭС–Юг»;
- правобережные зоны Хабаровского края и Приморья, ограниченные КС «Переход через Амур» и КС «Хабаровскэнерго – ПримГРЭС»;
- центральная часть энергосистемы Амурской области в границах КС «ОЭС – Запад Амурэнерго» и КС «Бурейская ГЭС – Амурская».

4. Оптимизация сетевой инфраструктуры: ми-

нимизация строительства дополнительных протяженных электропередач для интеграции новых генерирующих объектов в узлы нагрузок.

В настоящее время для контроля параметров энергосистемы используются различные программные комплексы, производящие расчеты режимов работы расчет величины протекающих токов, а также прогнозирование параметров [6–8]. Согласно оценке АО «Системный оператор ЕЭС» нехватка электроэнергии в Дальневосточном федеральном округе достигает 10,7 млрд кВт·ч. Для покрытия потребностей необходимо ввести 1,6 ГВт новых генерирующих мощностей.

Чтобы обеспечить растущее потребление территорий в срок до 2029 г., предлагается использовать разработку государственной корпорации «Росатом» плавучие энергетические блоки (ПЭБ). Преимущество ПЭБ – мобильность и относительно короткий цикл строительства. Ряд возможных мест строительства на Дальнем Востоке находится на Северном морском пути, это является важным для доставки атомных электростанций, а также решит проблему с транспортировкой топлива для теплоэлектростанций в удаленные регионы.

Таким образом, в ходе проведения анализа выявлен как положительный эффект от перспективного развития, так и его отсутствие в ряде регионов. Проблемы формирования достоверного прогноза – низкая реализация фактического технологического присоединения совместно с низкой реализацией планов по увеличению потребления. Однако намеченный план строительства промышленных объектов до 2042 г. позволяет сформировать устойчивую программу развития генерации и строительства новых электрических сетей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Селезнёв В., Губанов М., Потемкин В. Развитие распределенной генерации на Дальнем Востоке и в Арктике // Энергетическая политика. 2022. № 7(173). С. 58–69.
2. Схема и программа развития электроэнергетических систем России на 2024–2029 гг. Москва : Минэнерго России, 2023. 300 с.
3. Положение по управлению режимами работы энергосистемы в операционной зоне Филиала АО «СО ЕЭС» Тихоокеанское РДУ. Хабаровск : АО «СО ЕЭС», 2023. 57 с.
4. Стратегическое направление в области трансформации топливно-энергетического комплекса до 2030 г. : распоряжение от 12 марта 2024 г. № 581-р. Москва : Правительство Российской Федерации, 2024. 67 с.
5. Определение критических токовых нагрузок воздушных линий электропередачи разной длительности с учетом климатических факторов / И.В. Игнатенко, С.А. Власенко, Е.Ю. Тряпкин [и др.] // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2023. № 1(34). С. 51–57.
6. Эффективность использования автоматизированного расчёта аварийно допустимых токов в линиях электропередачи / А.Н. Кобылицкий, И.В. Игнатенко, С.А. Власенко [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2022. № 3(59). С. 21–26.
7. Автоматизация измерений параметров линий электропередачи / И.В. Игнатенко, С.А. Власенко, А.И. Пухова, М.В. Наконечный // Научные труды КубГТУ. 2022. № 3. С. 128–137.
8. Бурсак А. Малый атом: как АЭС малой мощности обеспечат энергией Дальний Восток, Арктику и весь мир // ВЭФ-2024. URL : <https://roscongress.org/materials/malyy-atom-kak-aes-maloy-moshchnosti-obespechat-energiey-dalniy-vostok-arktiku-i-ves-mir/> (дата обращения: 12.03.2025).

REFERENCES

1. Seleznev V., Gubanov M., Potemkin V. Razvitie raspredelennoj generacii na Dal'nem Vostoke i v Arktike [Development of distributed generation in the Far East and in the Arctic] // Energeticheskaya politika. 2022. № 7(173). S. 58–69.
2. Shema i programma razvitiya elektroenergeticheskikh sistem Rossii na 2024–2029 gg. [Scheme and development program of electric power systems in Russia for 2024-2029]. Moskva : MinEnerg Rossii, 2023. 300 s.
3. Polozhenie po upravleniju rezhimami raboty energosistemy v operacionnoj zone Filiala AO «SO EJeS» Tihookeanskoe RDU [Regulations on managing the operating systems of the energy system in the operating area of the branch of JSC «SO UES» Pacific RDU]. Khabarovsk : AO «SO YeEC», 2023. 57 s.
4. Strategicheskoe napravlenie v oblasti transformacii toplivno-energeticheskogo kompleksa do 2030 g. [Strategic direction in the field of transformation of the fuel and energy complex until 2030] : rasporyazhenie ot 12 marta 2024 g. № 581-r. Moskva : Pravitel'stvo Rossijskoj Federatsii, 2024. 67 s.
5. Opredelenie kriticheskikh tokovykh nagruzok vozdushnykh linij elektroperedachi raznoj dlitel'nosti s uchedom klimaticheskikh faktorov [Determination of critical current loads of air transmission lines of different durations, taking into account climatic factors] / I.V. Ignatenko, S.A. Vlasenko, E.Yu. Tyapkin [et al.] // Transport Aziatsko-Tihookeanskogo regiona. 2023. № 1 (34). S. 51–57.
6. Effektivnost' ispol'zovaniya avtomatizirovannogo raschyota avarijno dopustimyh tokov v liniyah elektroperedachi [Efficiency of using automated calculation of emergency allowable currents in power lines] / A.N. Kobylitsky, I.V. Ignatenko, S.A. Vlasenko [et al.] // Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2022. № 3(59). S. 21–26.
7. Avtomatizacija izmerenij parametrov linij elektroperedachi [Automation of measurements of parameters of power lines] / I.V. Ignatenko, S.A. Vlasenko, A.I. Pukhova, M.V. Nakonechny. // Nauchnye trudy KubGTU. 2022. № 3. S. 128–137.
8. Bursak A. Malyy atom: kak AJeS maloj moshhnosti obespechat energiej Dal'nij Vostok, Arktiku i ves' mir [Small atom: as a low-power nuclear power plant will provide energy to the Far East, the Arctic and the whole world] // VEF-2024. URL : <https://roscongress.org/materials/malyy-kak-aes-moshhchnosti-obespechat-energiej-dalnij-vostok-ass-i-ves-mir/> (data obrashcheniya: 12.03.2025).

Информация об авторах

Э.А. Рамазанова – ведущий специалист филиала АО «СО ЕЭС» Тихоокеанское РДУ;
И.В. Игнатенко – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения»;
С.А. Власенко – кандидат технических наук, доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Системы электроснабжения».

Information about the authors

E.A. Ramazanova – Leading Specialist of the branch of JSC «SO UES» Pacific RDU;
I.V. Ignatenko – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electricity Supply Systems;
S.A. Vlasenko – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Acting Head of Department of Electricity Supply Systems.

Статья поступила в редакцию 14.03.2025; одобрена после рецензирования 14.04.2025; принята к публикации 14.04.2025.
The article was submitted: 14.03.2025; approved after reviewing: 14.04.2025; accepted for publication: 14.04.2025.

Научная статья
УДК 624.04 (075.8)
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-78-88

О ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ОЦЕНКЕ ГРУЗОПОДЪЁМНОСТИ БАЛОЧНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

Тряпицын Юрий Владимирович¹, Мельников Владимир Олегович²,
Тряпкин Дмитрий Александрович³

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

¹ TryapitsinYV@mail.ru

² Dimasina84@mail.ru

³ dmitry.tryapkin@yandex.ru

Аннотация. При обследовании мостовых сооружений, на камеральном этапе обработки данных, необходимо определять грузоподъемность пролетных строений. В результате данной работы выявлены несоответствия расчетных значений изгибающих моментов главных балок, найденных с помощью численного моделирования (конечно-элементный расчет в ПК ЛИРА САПР) и аналитически (определение усилий в главных балках по методике, описанной в ВСН 32-89 [1], ОДМ 218.4.025-2016 [2]). При численном моделировании создавалась конечно-элементная модель из стержневых и пластинчатых КЭ, и выполнялся расчет в упругой постановке на основные загрузки, в то время как при аналитическом расчете использовалась методика, описанная в нормативном документе ОДМ 218.4.025-2016 [2], в которой для определения внутренних усилий элементов пролетного строения, используется метод коэффициента поперечной установки $K_{пу}$. В целях устранения погрешности расчета предложено дифференцированное определение и применение коэффициента поперечной установки для сосредоточенной и равномерно-распределенной нагрузки.

Ключевые слова: грузоподъемность мостов, коэффициент поперечной установки, МКЭ

Original article

ON THE ERROR OF THE TRANSVERSE INSTALLATION COEFFICIENT METHOD IN ASSESSING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF BEAM SPAN STRUCTURES OF HIGHWAY BRIDGES

Tryapitsin Yury V.¹, Melnikov Vladimir O.², Tryapkin Dmitry A.³

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

¹ TryapitsinYV@mail.ru

² Dimasina84@mail.ru

³ dmitry.tryapkin@yandex.ru

Abstract. When inspecting bridge structures, at the office stage of data processing, it is necessary to determine the load-bearing capacity of spans. As a result of this work, discrepancies were revealed between the calculated values of the bending moments of the main beams found using numerical modeling (finite element calculation in the LIRA SAPR software package) and analytically (determining the forces in the main beams using the method described in VSN 32-89 [1], ODM 218.4.025-2016 [2]). In the numerical modeling, a finite element model was created from rod and plate FE and the calculation was performed in an elastic setting for the main loads, while in the analytical calculation were applied the methods described in the regulatory document ODM 218.4.025-2016, in which the method of the transverse installation coefficient (hereinafter K_{pu}) is used to determine the internal forces of the span elements. To eliminate calculation errors, a differentiated definition and application of the transverse installation coefficient for concentrated and uniformly distributed loads is proposed.

Keywords: bridge load capacity, transverse installation coefficient, FEM

Введение

При определении грузоподъемности главных балок пролетных строений автодорожных мостов согласно СП 35.13330.2011 [3], ОДМ 218.4.025-2016 [2] используется метод $K_{пу}$, точность которого подвергается сомнению.

Цель исследования: определение причин различия в результатах расчета изгибающих моментов в главных балках, полученных численным (МКЭ) и аналитическим (ВСН 32-89 [1], ОДМ 218.4.025-2016 [2]) методами и учёт их в ОДМ 218.4.025-2016 [2].

Объект и методы исследования

Объект исследования: железобетонные балочные пролетные строения автодорожных мостов, объединенные монолитными швами бетонирования – шпонками. В реальных конструкциях данные сооружения работают преимущественно как изгибаемая в обоих направлениях плита, поддерживаемая продольными ребрами жесткости. Сложное напряженно-деформированное состояние плиты и продольных ребер жесткости, а также внутренняя статическая неопределимость системы не позволяют определить усилия и деформа-

ции методами ручного счета с обеспечением требуемой инженерной точности. В результате данных предпосылок логично прибегнуть к помощи широко распространенных программных комплексов на основе метода конечных элементов, способных с высокой точностью определить напряженно-деформированное состояние, по результатам которого возможно провести анализ и сравнить данные по перераспределению усилий в изгибаемых элементах пролетного строения. Данный анализ, как предполагается, позволит выявить различия в получаемых усилиях, определяемых по методикам ручного счета и по методу конечных элементов с определением причин данных различий.

Объект исследования состоит из шести главных балок таврового сечения без диафрагм, выполненных по типовому проекту 3.503-14 «Сборные железобетонные пролетные строения для автомобильных мостов», выпуск 5, шаг балок 1660 мм, пролет 17400 мм [4].

Описание опытной конечно-элементной модели

Пролетное строение представляет собой математическую модель, состоящую из стержневых и оболоченных конечных элементов. Стержневые конечные элементы (КЭ) моделируют главные балки пролетного строения, оболоченные КЭ – распределительную железобетонную плиту пролетного строения, являющуюся верхним поясом главных балок. Общий вид 3D-модели представлен на рис. 1.

Численное описание распределительной плиты происходит с помощью конечного элемента № 41 (КЭ № 41) – универсального прямоугольного КЭ оболочки. Данный КЭ предназначен для прочностного расчета тонких пологих оболочек. В каждом узле КЭ имеется по шесть степеней свободы, таким образом, данный КЭ учитывает весь спектр напряжений и деформаций и дает наиболее точную и полную картину при анализе НДС модели.

Для того чтобы изгибная жесткость распределительной плиты не участвовала в расчете дважды, использованы свойства ортотропии. Распределительная плита имеет разные жесткостные характеристики в двух перпендикулярных направлениях таким образом, чтобы изгибная жесткость участвовала только в поперечном направлении. В продольном направлении модуль упругости плиты «Е» занижен на два порядка, тем самым позволяя воспринимать всю нагрузку при изгибе вдоль пролетного строения изгибной жесткостью стержневых элементов – главных балок.

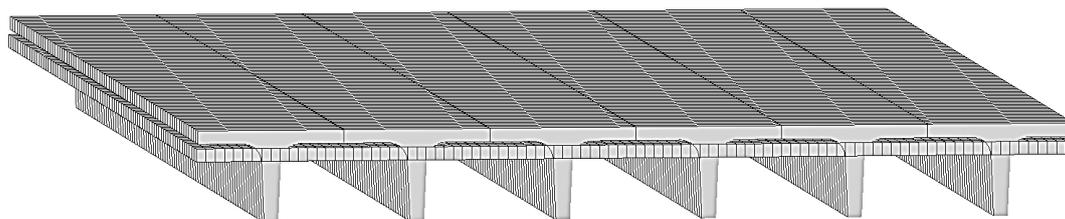


Рис. 1. Общий вид опытной конечно-элементной модели сооружения

Вид напряженно-деформированного состояния распределительной плиты описывается изгибом при отсутствии мембранных усилий. Данный факт возможен при условии отсутствия жестких вставок и эксцентриситетов приложения нагрузки по высоте сооружения.

Толщина распределительной плиты принимается равной толщине полки тавровых балок. Коэффициент Пуассона принимается равным 0,2. Модуль упругости второго рода G принимается равным $1,28 \cdot 10^6$ т/м². Вес распределительной плиты не учитывается. Модуль упругости E при изгибе вдоль пролета принимается равным $0,9 \cdot 10^4$ т/м². Модуль упругости E при изгибе поперек пролета принимается равным $0,9 \cdot 10^6$ т/м². Начальный модуль упругости бетона балок Е класса по прочности В25 равен $3,0 \cdot 10^6$ т/м², с учетом понижающего коэффициента 0,6. Данный коэффициент вводится в модель для учета образования трещин в нижней и верхней зоне полки главных балок.

Таким образом, данная математическая модель максимально приближена к натурной, и условное задание жесткости распределительной плиты и верхнего пояса тавровых балок пролетного строения сведено к минимуму и практически отсутствует (рис. 2).

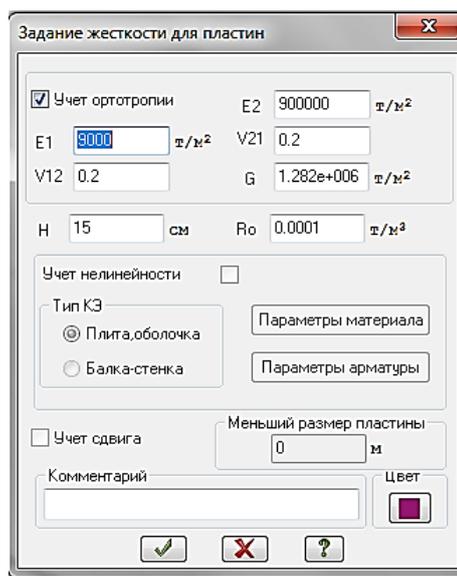


Рис. 2. Жесткостные характеристики распределительной плиты

ON THE ERROR OF THE TRANSVERSE INSTALLATION COEFFICIENT METHOD IN ASSESSING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF BEAM SPAN STRUCTURES OF HIGHWAY BRIDGES

Численное описание стержневых конечных элементов происходит с помощью конечного элемента № 10 (КЭ № 10) – универсального пространственного стержневого элемента. В каждом узле КЭ имеется по шесть степеней свободы, таким образом, данный КЭ учитывает весь спектр напряжений и деформаций и дает наиболее точную и полную картину при анализе НДС модели.

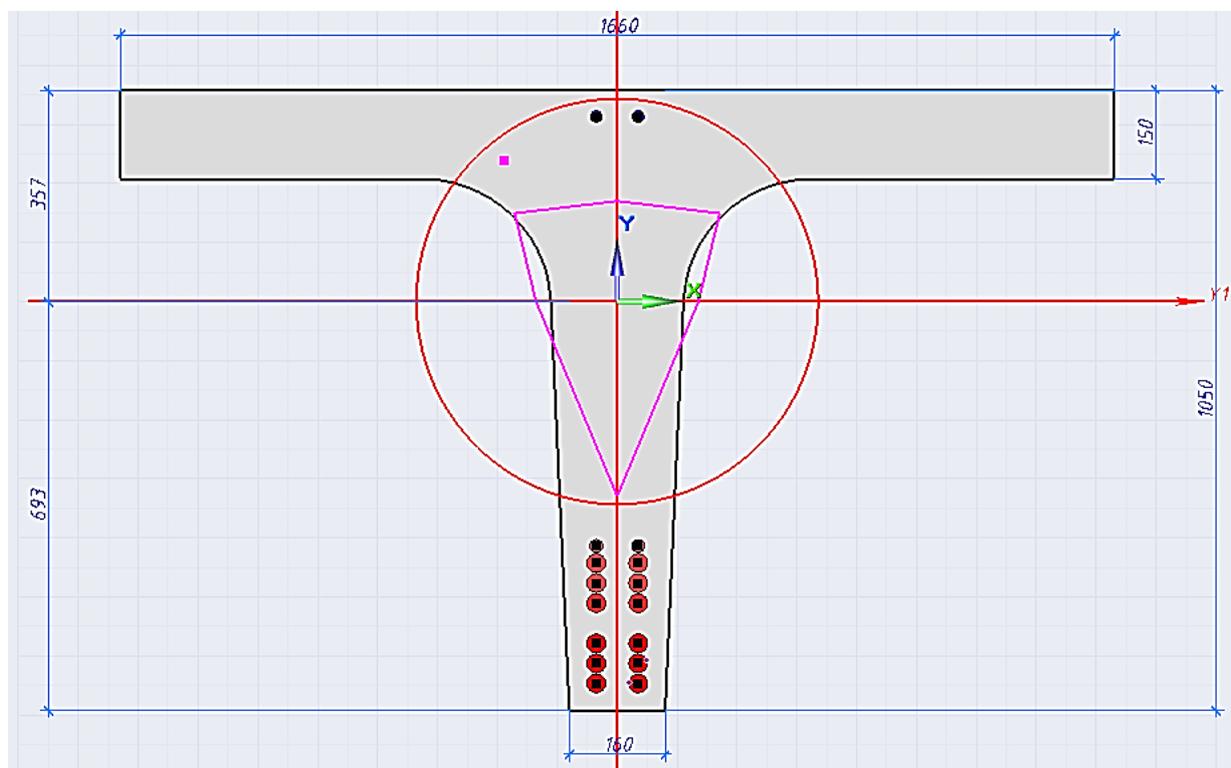
При моделировании стержневых КЭ главных балок пролетного строения рассматривалось три варианта вычисления момента инерции поперечного сечения при подсчете:

- 1) момента инерции учитывалась полная площадь бетонного сечения и площадь рабочей арматуры;
- 2) момента инерции учитывалась полная площадь бетонного сечения;

3) момента инерции учитывалась редуцированная площадь бетонного сечения и площадь рабочей арматуры.

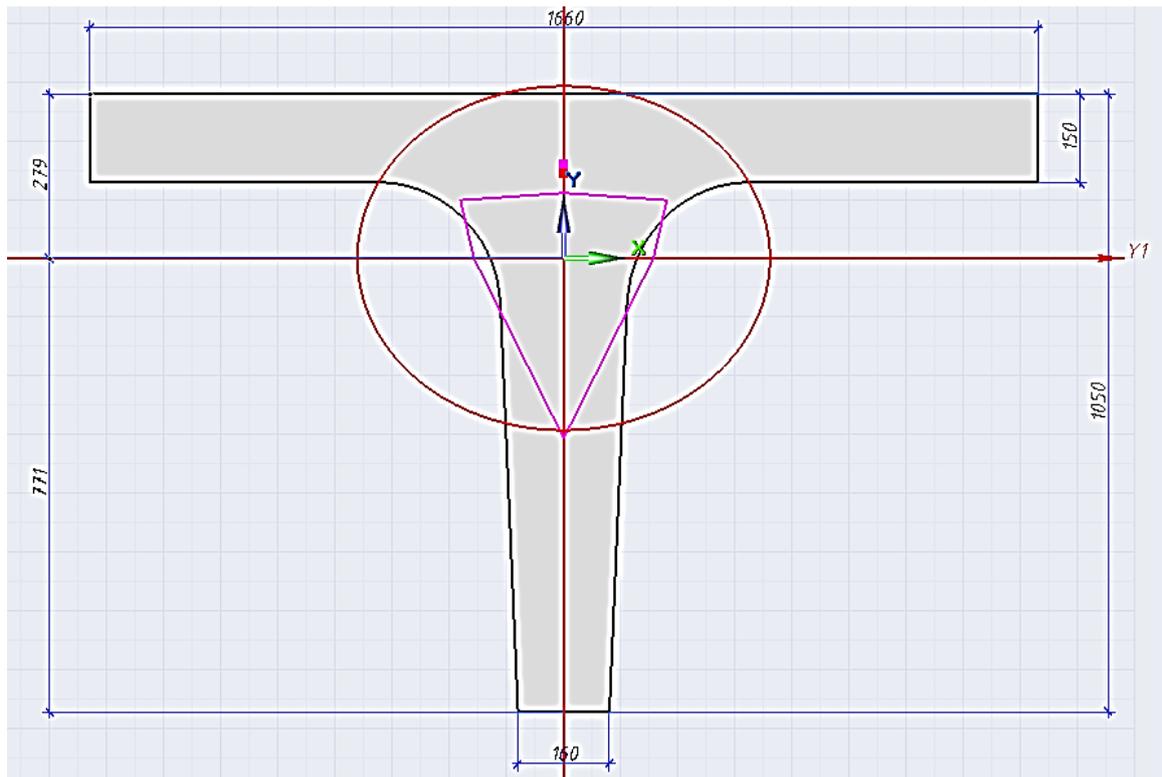
Первое описание жесткости стержневых элементов, очевидно, будет давать завышенный результат жесткости, поскольку в натурной модели бетонное сечение под действием расчетного изгибающего момента выключается из работы в силу появления трещин. Поперечное сечение и жесткостные характеристики первого варианта приведены на рис. 3.

Второе описание жесткости стержневых элементов неверно в принципе, поскольку жесткость главных балок невозможно вычислить без учета рабочей арматуры, которая дает весомый вклад в суммарное значение момента инерции поперечного сечения. Поперечное сечение и жесткостные характеристики второго варианта приведены на рис. 4.



Жесткостные характеристики			
EA	1556459.599552	тс	Осевая жесткость
EI _u	183379.749542	тс·м ²	Изгибная жесткость относительно центральной оси U
EI _v	175212.543546	тс·м ²	Изгибная жесткость относительно центральной оси V
EI _{uv}	0	тс·м ²	Центробежная жесткость относительно центральных осей UV
EI _y	183379.749542	тс·м ²	Изгибная жесткость относительно главной оси Y1
EI _z	175212.543546	тс·м ²	Изгибная жесткость относительно главной оси Z1
ES _y	186080.206582	тс·м	Произведение статического момента полусечения на его модуль упругости относительно главной оси Y1
ES _z	229340.401779	тс·м	Произведение статического момента полусечения на его модуль упругости относительно главной оси Z1
GJ _t	7597.919243	тс·м ²	Жесткость на кручение - произведение модуля сдвига на крутильный момент инерции
EI _w	-3682.697573	тс·м ⁴	Секториальная жесткость - произведение модуля упругости на секториальный момент инерции
GF _y	322124.033181	тс	Сдвиговая жесткость Y1 - произведение модуля сдвига на сдвиговую площадь относительно главной оси Y1
GF _z	228757.485581	тс	Сдвиговая жесткость Z1 - произведение модуля сдвига на сдвиговую площадь относительно главной оси Z1

Рис. 3. Поперечное сечение главной балки пролетного строения при расчете жесткостных характеристик по первому варианту



Жесткостные характеристики			
EA	1341299.6665	тс	Осевая жесткость
EI _u	114634.96773	тс·м ²	Изгибная жесткость относительно центральной оси U
EI _v	174948.97262	тс·м ²	Изгибная жесткость относительно центральной оси V
EI _{uv}	0	тс·м ²	Центробежная жесткость относительно центральных осей UV
EI _y	114634.96773	тс·м ²	Изгибная жесткость относительно главной оси Y1
EI _z	174948.97262	тс·м ²	Изгибная жесткость относительно главной оси Z1
ES _y	162998.30204	тс·м	Произведение статического момента полусечения на его модуль упругости относительно главной оси Y1
ES _z	173127.53741	тс·м	Произведение статического момента полусечения на его модуль упругости относительно главной оси Z1
GJ _t	7596.982325	тс·м ²	Жесткость на кручение - произведение модуля сдвига на крутильный момент инерции
EI _w	731.216694	тс·м ⁴	Секториальная жесткость - произведение модуля упругости на секториальный момент инерции
GF _y	322123.03893	тс	Сдвиговая жесткость Y1 - произведение модуля сдвига на сдвиговую площадь относительно главной оси Y1
GF _z	219219.83876	тс	Сдвиговая жесткость Z1 - произведение модуля сдвига на сдвиговую площадь относительно главной оси Z1

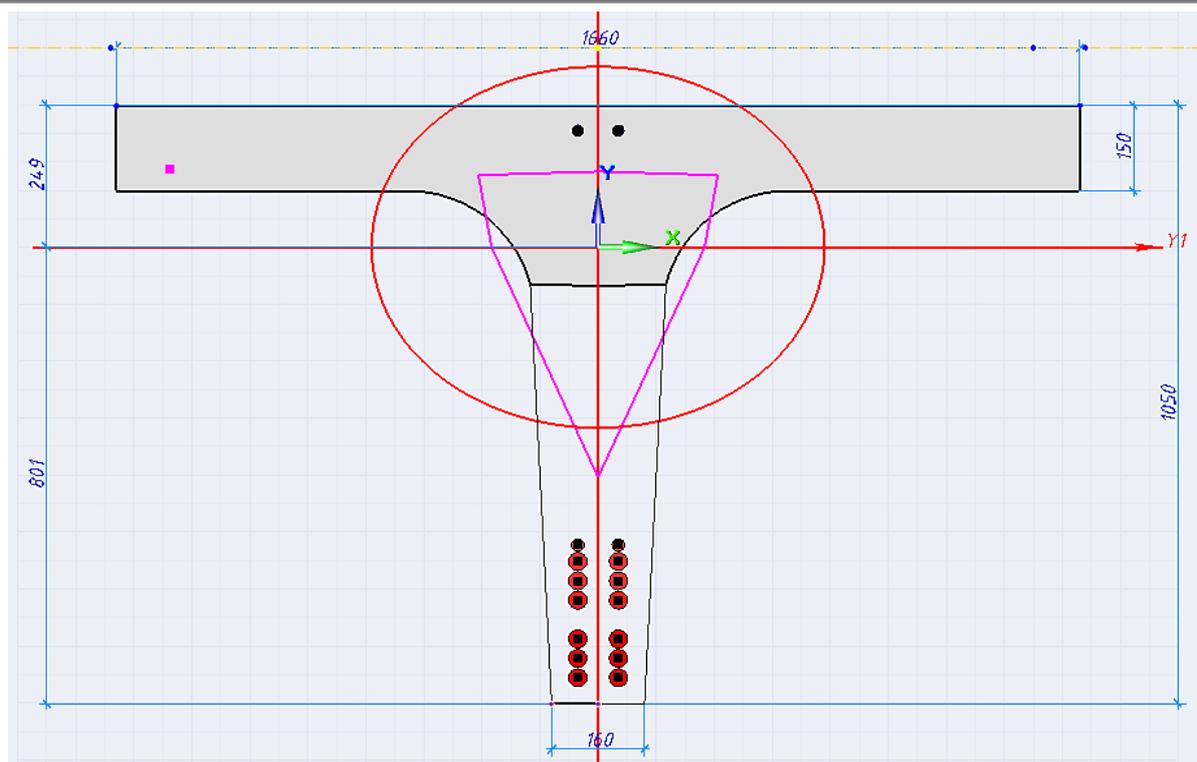
Рис. 4. Поперечное сечение главной балки пролетного строения при расчете жесткостных характеристик по второму варианту

Третий вариант – наиболее подходящий для принятия в расчет, поскольку в реальной конструкции при действии расчетных изгибающих моментов сечение представляет собой: в верхней части – сжатую зону бетона, в нижней части – пучок рабочей арматуры. Сумма жесткостей с учетом коэффициента приведения стали к бетону и нового положения центра тяжести главных центральных осей инерции дает при расчете истинную жесткость поперечного сечения. Поперечное сечение и жесткостные характеристики третьего варианта приведены на рис. 5.

Следует отметить важность определения геометрических (жесткостных) параметров сечения, поскольку весь метод конечных элементов основан на определении деформаций модели в каждом узле с последующим переходом к напряжениям и усилиям по известным законам. В случае неверного или не-

точного принятия жесткости главных балок, ошибка в вычислении деформаций и, как следствие, напряжений и внутренних усилий будет непоправима.

Также следует отметить довод в пользу третьего варианта: бетонное сечение может воспринять изгибающий момент, равный произведению момента сопротивления бетонного сечения на расчетное сопротивление бетона растяжению. Эта величина изгибающего момента будет соответствовать моменту появления трещин в бетонном сечении. Как показывает расчет, величина этого момента составляет 3–7 % от расчетного значения для балок таврового сечения. То есть почти по всей длине пролета, где действует изгибающий момент, равный 7 % от расчетного и более, будет происходить перераспределение усилий и пересчет жесткости поперечного сечения с редуцированием бетона нижней зоны.



Жесткостные характеристики			
EA	1141971.1741	тс	Осевая жесткость
EI _u	114605.95223	тс·м ²	Изгибная жесткость относительно центральной оси U
EI _v	173865.62369	тс·м ²	Изгибная жесткость относительно центральной оси V
EI _{uv}	0	тс·м ²	Центробежная жесткость относительно центральных осей UV
EI _y	114605.95223	тс·м ²	Изгибная жесткость относительно главной оси Y1
EI _z	173865.62369	тс·м ²	Изгибная жесткость относительно главной оси Z1
ES _y	72863.646880	тс·м	Произведение статического момента полусечения на его модуль упругости относительно главной оси Y1
ES _z	232663.12498	тс·м	Произведение статического момента полусечения на его модуль упругости относительно главной оси Z1
GJ _t	4661.620536	тс·м ²	Жесткость на кручение - произведение модуля сдвига на крутильный момент инерции
EI _w	-13002.80465	тс·м ⁴	Секториальная жесткость - произведение модуля упругости на секториальный момент инерции
GF _y	315754.85065	тс	Сдвиговая жесткость Y1 - произведение модуля сдвига на сдвиговую площадь относительно главной оси Y1
GF _z	10327.243908	тс	Сдвиговая жесткость Z1 - произведение модуля сдвига на сдвиговую площадь относительно главной оси Z1

Рис. 5. Поперечное сечение главной балки пролетного строения при расчете жесткостных характеристик по третьему варианту

Третий вариант подсчета жесткости по своей сути является квазинелинейным, с погрешностью в сторону запаса прочности, поскольку редуцированное сечение принимается по всей длине пролета.

Таким образом, третий вариант по праву занимает доминантное положение в сравнении с двумя другими. Общие характеристики материала главных балок, принимаемые в расчете, приведены на рис. 6.

	Бетон В25		Материал
E	Зсб	т/м ²	Модуль упругости материала
G	1.25e6	т/м ²	Модуль сдвига материала
ν	0.2		Коэффициент Пуассона материала

Рис. 6. Общие характеристики материала главных балок, используемые при расчетах

Верификация комбинированной стержне-пластинчатой (опытной) конечно-элементной модели проводилась в два этапа на предмет правильного перераспределения нагрузки между элементами и идентичности напряженно-деформированного состояния в упругой стадии. В данной проверке важно было выяснить верность перераспределений усилий, напряжений и деформаций с распределительной плиты на стержневые элементы главных балок.

Необходимо было получить идентичные нормальные напряжения в нижних волокнах главных балок по результатам комбинированной модели и натурной модели-аналога, составленной из оболочечных КЭ.

Сравнение опытной модели с натурной моделью-аналогом

Основным доводом по верификации моделей между собой считается изначальная верификация самого программного комплекса «ЛИРА», обладающего необходимым и достаточным набором сертификатов, отчетов и лицензий, а также общим признанием научного сообщества. Далее, при общих гипотезах по упругому деформированию, при точном соответствии натурной модели-аналога и опытной комбинированной (конечно-элементной) модели результаты напряженно-деформированного состояния можно принимать за истинные. Таким образом, при соответствии НДС у опытной комбинированной стержне-пластинчатой модели и оболочечной, в заданном диапазоне погрешности 1–3 % можно считать опытную модель адекватно применимой в условиях данной задачи.

Поперечное сечение пролетного строения натурной модели-аналога, составленной только из оболочечных КЭ представлено на рис. 7. Данная модель является более приближенной к натурному сооружению. Уширение ребра главной балки учитывалось попеременным уширением толщины пластины.

Все расчеты и исследования производились на примерах трех объектов исследования.

Шаг разбивки КЭ модели в горизонтальной плоскости был выполнен 1/80 по длине пролета

и 1/100 по ширине пролета. Шаг разбивки КЭ модели ребер балок был выполнен в 2 яруса: 1/15 – в верхней зоне и 1/30 – в нижней зоне. Данная разбивка сетки КЭ модели обеспечивает необходимую точность получения результатов.

Геометрические характеристики принимались по второму варианту подсчета жесткости балок (рис. 4). Моменты сопротивления сечения W_x определялись по формуле (1). Модуль упругости и коэффициент Пуассона оболочечной модели были приняты соответственно равные $3 \cdot 10^6$ т/м² и 0,2 по всему поперечному сечению

$$W_x = \frac{EI}{E_6 h_{\text{цт}}} = \frac{114\,635}{3\,000\,000 \cdot 77,1} = 0,049561 \text{ м}^3. \quad (1)$$

Нагружение моделей производилось равномерно-распределенной нагрузкой, имитирующей временную подвижную нагрузку А14 с тележкой посередине пролета. Нагрузка от тележки задавалась равномерно-распределенной по площади опирания колеса в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52748-2007 [5]. Результаты сведены в табл. 1, 2.

В результате анализа данных, полученных при сравнении напряжений в нижних волокнах ребер главных балок, погрешность составляет менее 4 %. Следовательно, верификацию опытной модели относительно оболочечной можно считать выполненной.

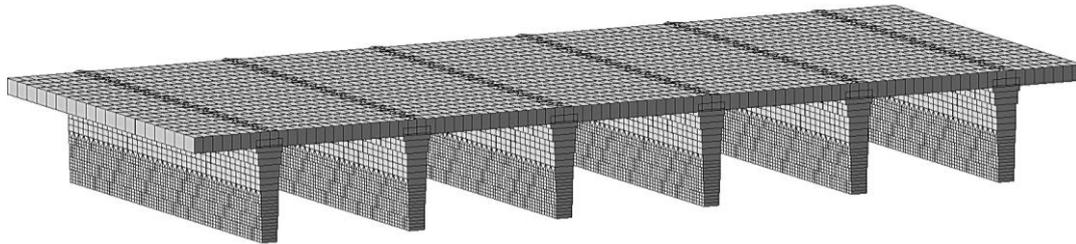


Рис. 7. Общий вид 3D-модели, составленной из оболочечных КЭ

Таблица 1

Сравнение напряжений в нижних волокнах ребер балок от действия подвижной нагрузки А14

	Нормер ГБ	Опытная комбинированная, стержне-пластинчатая модель			Оболочечная КЭ модель	Δ, %
		M_x , тм	W_x , м ³	$\sigma_x = M_x/W_x$, т/м ²	σ_x , т/м ²	
Нагрузка А14 с тележкой посередине пролета	1	68,5	0,049561	1382,1	1376	0,45
	2	52,1		1051,2	1047	0,40
	3	29,2		589,2	587	0,37
	4	12,6		254,2	246	3,35
	5	3,6		72,6	49,6	46,45
	6	-1,17		-23,6	-63,4	62,76

Таблица 2

Сравнение напряжений в нижних волокнах ребер балок от действия подвижной нагрузки А14 + собственный вес плиты

	Нормер ГБ	Опытная комбинированная, стержне-пластинчатая модель			Оболочечная КЭ модель	Δ, %
		M_x , тм	W_x , м ³	$\sigma_x = M_x/W_x$, т/м ²	σ_x , т/м ²	
Нагрузка А14 с тележкой посередине пролета + собственный вес плиты	1	92,4	0,049561	1864,4	1840	1,32
	2	75,4		1521,4	1501	1,36
	3	52,3		1055,3	1038	1,66
	4	35,7		720,3	694	3,79
	5	26,7		538,7	503	7,10
	6	22,6		456,0	403	13,15

Классические методы определения $K_{\text{пн}}$

Для определения усилий в главных балках пролетного строения были разработаны различные методики. Речь идет о методах определения коэффициента поперечной установки. В настоящее время науке известно несколько из таких методов. Методы грубой точности: метод рычага; метод внецентренного сжатия. Методы средней точности: метод упругих опор; метод балочного ростверка. Методы высокой точности: метод Б.Е. Улицкого; энергетический метод Л.В. Семенца и Н.П. Лукина; метод шарнирной цепи М.Е. Гибшмана [6–8].

Методы грубой и средней точности могут предоставить необходимую, но нередко недостаточную точность в расчете. Методы высокой точности связаны с длительными и сложными вычислениями, основанными на численных методах решения дифференциальных уравнений. Однако на практике, как правило, задача по определению коэффициента поперечной установки для массового инженера сводится к использованию готовых табличных значений по заданным параметрам сооружения.

Метод определения коэффициента поперечной установки с помощью КЭ программных комплексов

На данный момент существует возможность использовать программные комплексы, позволяющие быстро и точно определять НДС отдельно взятой балки в пролетном строении, применяя метод конечных элементов. Также данные программы показывают более правильное перераспределение усилий в конструкции пролетного строения при упругой постановке задачи. Точность решения задачи зависит от густоты конечно-элементной сетки и типа самих конечных элементов. Наиболее точную картину развития НДС всей конструкции описывают объемные конечные элементы, однако, следует отметить, что для инженерных расчетов хватает точности оболоченных конечных элементов, тогда как при моделировании задачи объемными конечными элементами времени, на численное описание и решение задачи затрачивается больше, чем выигранная точность расчета, которая редко доходит до 2–4 %.

Поскольку внешне система пролетного строения является статически определимой, то распределение усилий происходит только внутри пролета – между главными балками.

После построения численной модели пролетного сооружения необходимо создать загрузку с сосредоточенной силой P , действующей в середине пролета интересующей нас балки, и выполнить расчет. После проведения расчета мы получим картину распределения изгибающих моментов по всему пролетному строению. По этим данным можно вычислить ординаты линии влияния коэффициента поперечной установки, ткм, используя формулу (2)

$$n_k = \frac{M_x^k}{\sum_{k=1}^R M_x^k}, \quad (2)$$

где n_k – ордината линии влияния $K_{\text{пн}}$; M_x^k – изгибающий момент в k -й балке пролетного строения, тм; $\sum_{k=1}^R M_x^k$ – суммарный изгибающий момент всех балок пролетного строения, тм, где R – количество балок пролетного строения.

Данные по определению $K_{\text{пн}}$ представлены в табличном виде. Объект исследования № 1 – табл. 3–5, объект исследования № 2 – табл. 6–8, объект исследования № 3 – табл. 9–11. В табл. 3–11 промежуточные значения между главными балками определялись линейной интерполяцией. Суммарный вес от равномерно-распределенной нагрузки равнялся 10 тс, что эквивалентно сосредоточенной силе. Расположение точек в поперечном сечении пролетного строения представлено на рис. 8.

Таблица 3

Значения ординат поперечных линий влияния $K_{\text{пн}}$ посередине пролета ГБ1 по объекту исследования

Номер точки	От силы $P = 10$ тс	$M_x(P)$	От силы $q = 0,575$ тс/м	$M_x(q)$
1				
2 – ГБ1	0,696	30,400	0,629	13,700
3	0,468		0,462	
4 – ГБ2	0,240	10,500	0,295	6,420
5	0,152		0,188	
6 – ГБ3	0,063	2,750	0,080	1,750
7	0,035		0,044	
8 – ГБ4	0,006	0,275	0,008	0,165
9	0,001		0,001	
10 – ГБ5	-0,005	-0,219	-0,007	-0,142
11	-0,003		-0,006	
12 – ГБ6	0,000	-0,020	-0,006	-0,125
13				
Σ	1,000	43,686	1,000	21,768

Таблица 4

Значения ординат поперечных линий влияния $K_{\text{пн}}$ посередине пролета ГБ2 по объекту исследования

Номер точки	От силы $P = 10$ тс	$M_x(P)$	От силы $q = 0,575$ тс/м	$M_x(q)$
1				
2 – ГБ1	0,237	10,300	0,291	6,320
3	0,362		0,330	
4 – ГБ2	0,488	21,200	0,370	8,040
5	0,343		0,305	
6 – ГБ3	0,197	8,580	0,240	5,220
7	0,133		0,164	
8 – ГБ4	0,069	2,990	0,088	1,920
9	0,041		0,053	
10 – ГБ5	0,014	0,596	0,017	0,376
11	0,004		0,006	
12 – ГБ6	-0,005	-0,208	-0,006	-0,134
13				
Σ	1,000	43,458	1,000	21,742

Таблица 5

Значения ординат поперечных линий влияния $K_{\text{пл}}$ посередине пролета ГБЗ по объекту исследования

Номер точки	От силы $P = 10 \text{ тс}$	$M_x(P)$	От силы $q = 0,575 \text{ тс/м}$	$M_x(q)$
1				
2 – ГБ1	0,065	2,840	0,083	1,810
3	0,130		0,160	
4 – ГБ2	0,195	8,500	0,237	5,150
5	0,333		0,293	
6 – ГБ3	0,471	20,500	0,349	7,590
7	0,332		0,292	
8 – ГБ4	0,193	8,400	0,234	5,090
9	0,131		0,161	
10 – ГБ5	0,068	2,960	0,087	1,890
11	0,038		0,048	
12 – ГБ6	0,007	0,310	0,009	0,191
13				
Σ	1,000	43,510	1,000	21,721

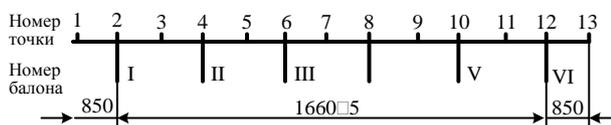


Рис. 8. Схема поперечного сечения пролетного строения по объекту исследования

Сравнение ординат линий влияния $K_{\text{пл}}$, полученных численным методом с данными из таблиц ОДМ 218.4.026-2016

При выполнении расчетов существующих пролетных сооружений автодорожных мостов на действия подвижных временных нагрузок были выявлены существенные различия в искомых величинах изгибающих моментов, найденных аналитическим расчетом и численным моделированием. Для того, чтобы понять, почему результаты численного моделирования и аналитические расчеты не сходятся, нужно сравнить ординаты линий влияния $K_{\text{пл}}$, полученные, соответственно, численно и аналитически. Методика определения ординат линий влияния $K_{\text{пл}}$ численным методом сведена к формуле (2). Методика определения ординат линий влияния $K_{\text{пл}}$ аналитическим методом имеет несколько вариантов (метод рычага, метод внецентренного сжатия, метод упругих опор). В нормативных документах [1, 2] представлены ранее вычисленные ординаты линий влияния для конкретных пролетных сооружений. В рамках данной работы на примере трех пролетных строений было проведено сравнение полученных ординат линий влияния $K_{\text{пл}}$ с целью определения различного влияния разного рода нагрузки (сосредоточенной и равномерно-распределенной) на распределение усилий между главными балками пролетного строения. Данные, полученные с помощью конечно-элементного расчета и выписанные из нормативных документов по объектам исследования, представлены в табл. 6–8 и на рис. 9–11.

Таблица 6

Значения ординат линий влияния $K_{\text{пл}}$ ГБ1, полученные от действия сосредоточенной, равномерно-распределенной нагрузки, и выписанные значения из ОДМ/ВСН

Номер точки	По ВСН	От силы P	$\Delta(P \text{ и } \text{ВСН}), \%$	От силы q	$\Delta(q \text{ и } \text{ВСН}), \%$
1	0,701				
2 – ГБ1	0,558	0,696	24,7	0,629	12,8
3	0,438	0,468	6,9	0,462	5,5
4 – ГБ2	0,325	0,240	26,0	0,295	9,3
5	0,223	0,152	32,0	0,188	15,8
6 – ГБ3	0,145	0,063	56,6	0,080	44,6
7	0,080	0,035	56,7	0,044	45,0
8 – ГБ4	0,038	0,006	83,4	0,008	80,1
9	0,004	0,001	84,0	0,001	86,8
10 – ГБ5	-0,018	-0,005	72,1	-0,007	63,8
11	-0,036	-0,003	92,4	-0,006	83,0
12 – ГБ6	-0,049	0,000	99,1	-0,006	88,3
13	-0,064				

Таблица 7

Значения ординат линий влияния $K_{\text{пл}}$ ГБ2, полученные от действия сосредоточенной, равномерно-распределенной нагрузки, и выписанные значения из ОДМ/ВСН

Номер точки	По ВСН	От силы P	$\Delta(P \text{ и } \text{ВСН}), \%$	От силы q	$\Delta(q \text{ и } \text{ВСН}), \%$
1	0,328				
2 – ГБ1	0,326	0,237	27,3	0,291	10,8
3	0,322	0,362	12,6	0,330	2,6
4 – ГБ2	0,302	0,488	61,5	0,370	22,4
5	0,273	0,343	25,5	0,305	11,7
6 – ГБ3	0,226	0,197	12,6	0,240	6,2
7	0,174	0,133	23,5	0,164	5,6
8 – ГБ4	0,123	0,069	44,1	0,088	28,2
9	0,077	0,041	46,4	0,053	31,4
10 – ГБ5	0,041	0,014	66,6	0,017	57,8
11	0,009	0,004	50,4	0,006	38,2
12 – ГБ6	-0,018	-0,005	73,4	-0,006	65,8
13	-0,044				

Таблица 8

Значения ординат линий влияния $K_{\text{пл}}$ ГБ3, полученные от действия сосредоточенной, равномерно-распределенной нагрузки и выписанные значения из ОДМ/ВСН

Номер точки	По ВСН	От силы P	$\Delta(P \text{ и } \text{ВСН}), \%$	От силы q	$\Delta(q \text{ и } \text{ВСН}), \%$
1	0,102				
2 – ГБ1	0,145	0,065	55,0	0,083	42,5
3	0,189	0,130	31,1	0,160	15,2
4 – ГБ2	0,226	0,195	13,6	0,237	4,9
5	0,254	0,333	31,2	0,293	15,5
6 – ГБ3	0,256	0,471	84,0	0,349	36,5
7	0,246	0,332	35,0	0,292	18,7
8 – ГБ4	0,211	0,193	8,5	0,234	11,1
9	0,169	0,131	22,8	0,161	4,9
10 – ГБ5	0,123	0,068	44,7	0,087	29,3
11	0,078	0,038	51,8	0,048	38,6
12 – ГБ6	0,038	0,007	81,3	0,009	76,9
13	0,000				

ON THE ERROR OF THE TRANSVERSE INSTALLATION COEFFICIENT METHOD IN ASSESSING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF BEAM SPAN STRUCTURES OF HIGHWAY BRIDGES

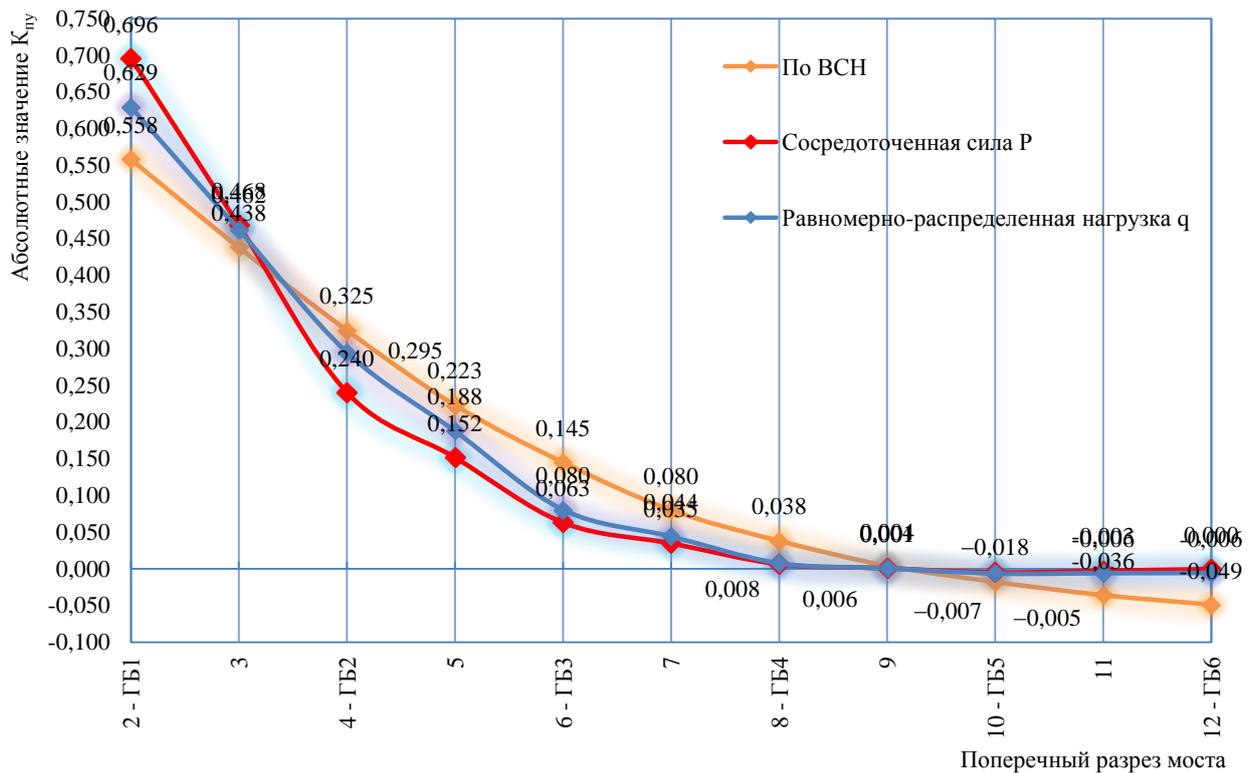


Рис. 9. График линий влияния коэффициента поперечной установки ГБ1 L = 17 400 мм, полученный от действия сосредоточенной, равномерно-распределенной нагрузки, и выписанные значения из ОДМ 218.4.026-2016/ВСН 32-89

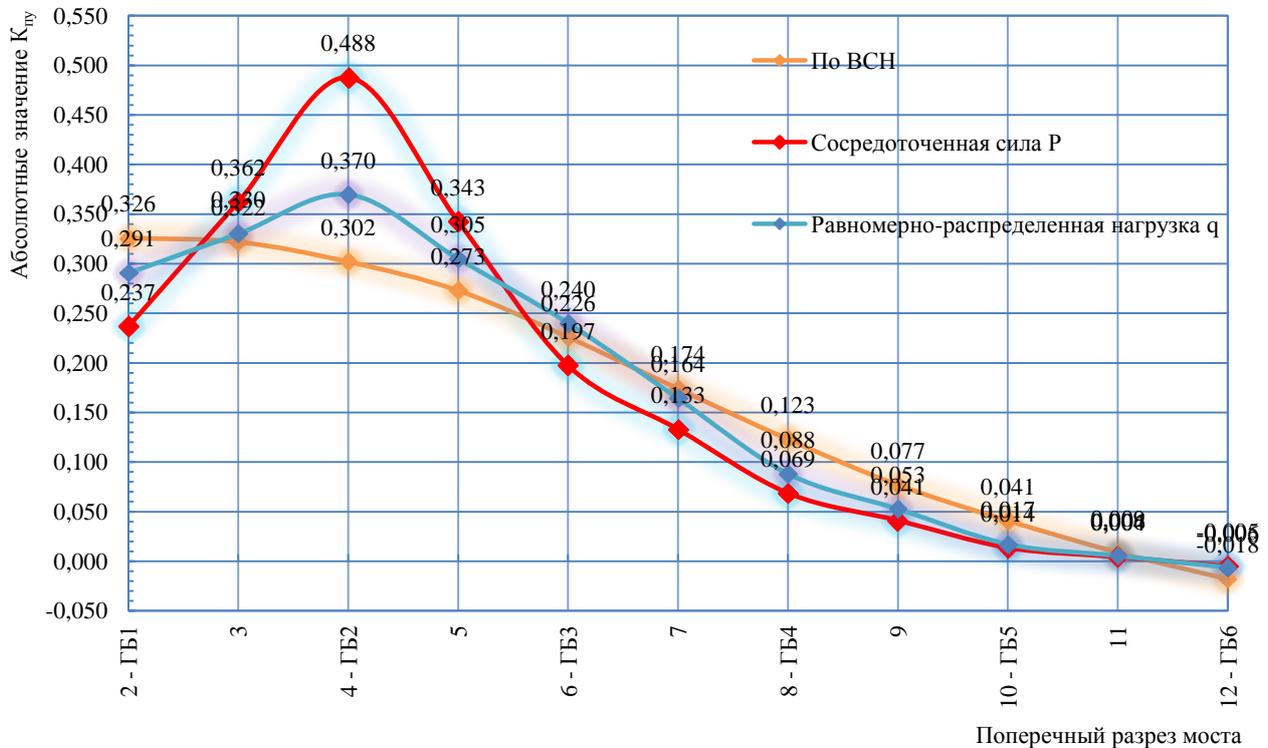


Рис. 10. График линий влияния коэффициента поперечной установки ГБ2 L = 17 400 мм, полученный от действия сосредоточенной, равномерно-распределенной нагрузки и выписанные значения из ОДМ 218.4.026-2016 / ВСН 32-89

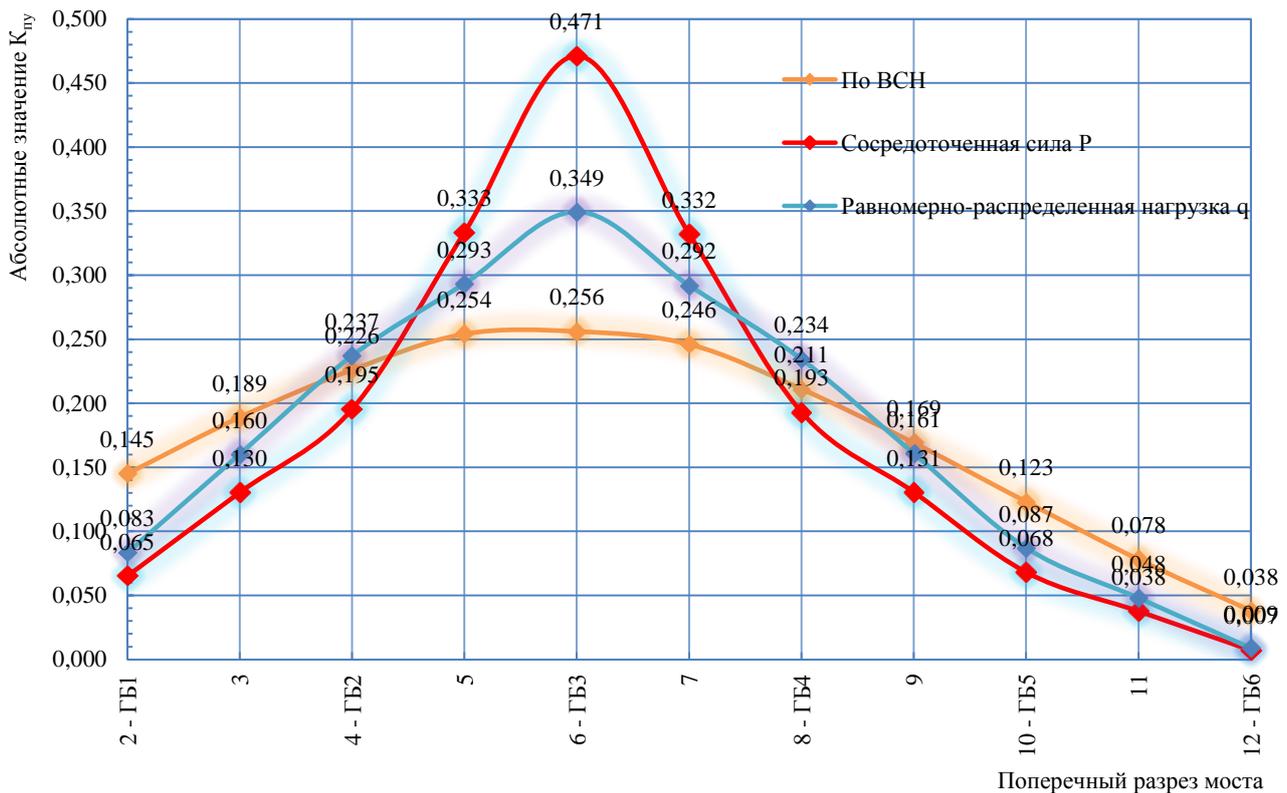


Рис. 11. График линий влияния коэффициента поперечной установки ГБЗ $L = 17\ 400$ мм, полученный от действия сосредоточенной, равномерно-распределенной нагрузки, и выписанные значения из ОДМ 218.4.026-2016 / ВСН 32-89

Результаты

По результатам инфографики (рис. 8–10, табл. 11–13) видно, что значения ординат линий влияния $K_{пу}$, определенных по действующим в настоящее время отраслевым дорожным методикам с ординатами МКЭ, очень отличаются: разница достигает 84 % по ординатам линий влияния $K_{пу}$ искомых главных балок. Характерные «скачки» функции на графике происходят именно над теми главными балками, относительно которых строится график. Хвостовые участки имеют разницу в диапазоне от 8 до 50 %, что также не укладывается в общепринятые инженерные погрешности 3–5 %.

Наиболее важное влияние оказывает тот факт, что разного рода нагрузка неодинаково действует на пролет и на перераспределения усилий и деформаций между главными балками пролетного строения. По графикам можно отследить, что сосредоточенная нагрузка имеет ярко выраженный характер в месте действия, с таким же стремительным затуханием при удалении от точки приложения силы.

Равномерно-распределенная нагрузка действует на сооружение более «плавно», с меньшими скачками в характерных точках, однако, даже эта функция имеет разницу 30–35 % в пиковых значениях по сравнению с данными из ОДМ 218.4.026-2016 / ВСН 32-89.

Выводы

В работе выявлены причины различия в результатах определения изгибающих моментов главных балок, полученных численным (МКЭ) и аналитическим (ОДМ 218.4.025-2016) методами, которые заключались в разном влиянии нагрузок на перераспределение внутренних усилий и деформаций по пролетному строению. Предлагается к дальнейшему изучению и учету в нормативной документации дифференцированное определение и применение коэффициента поперечной установки для сосредоточенной и равномерно-распределенной нагрузки. При неучете данного факта результаты расчета могут негативно влиять на надежность сооружений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ВСН 32-89. Инструкция по определению грузоподъемности железобетонных балочных пролетных строений эксплуатируемых автодорожных мостов // Минавтодор РСФСР. Москва : Транспорт, 1988. 133 с.
2. ОДМ 218.4.026-2016. Рекомендации по определению грузоподъемности мостовых сооружений на автомобильных дорогах общего пользования. Бетонные и железобетонные конструкции. Москва, 2016.

ON THE ERROR OF THE TRANSVERSE INSTALLATION COEFFICIENT METHOD IN ASSESSING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF BEAM SPAN STRUCTURES OF HIGHWAY BRIDGES

3. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная версия СНиП 2.05.03-84. Москва : ОАО «ЦНИИС», 2011.
4. Типовой проект 3.503-14. Сборные железобетонные пролетные строения для автодорожных мостов. Вып. 5. Пролетные строения без диафрагм длиной 12, 15 и 18 м. Москва : Союздорпроект, 1974. 50 с.
5. ГОСТ Р 52748-2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения. Москва : ООО «Дорожный инженерный центр» ; Российская академия транспорта, 2008. 17 с.
6. Гибшман М.Е., Попов В.И. Проектирование транспортных сооружений : учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1988. 447 с.
7. Семенец Л.В. Пространственные расчёты плитных мостов. Киев : Вища школа, 1976. 164 с.
8. Российский В.А., Назаренко Б.П., Словинский Н.А. Примеры проектирования сборных железобетонных мостов. Киев : Вища школа, 1970. 520 с.

REFERENCES

1. VSN 32-89. Instruksiya po opredeleniyu gruzopod'emnosti zhelezobetonnyh balochnyh prolyotnyh stroyenij ekspluatiruyemykh avtodorozhnykh mostov [VSN 32-89. Instructions for determining the load-bearing capacity of reinforced concrete beam spans of operated highway bridges] // Minavtodor RSFSR. Moskva : Transport, 1988. 133 s.
2. ODM 218.4.026-2016. Rekomendatsii po opredeleniyu gruzopod'emnosti mostovykh sooruzhenij na avtomobil'nykh dorogah obshchego pol'zovaniya [ODM 218.4.026-2016. Recommendations for determining the load-bearing capacity of bridge structures on public roads]. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Moskva, 2016.
3. SP 35.13330.2011. Mosty i truby [SP 35.13330.2011. Bridges and pipes]. Aktualizirovannaya versiya SNiP 2.05.03-84. Moskva : ОАО «TsNIIS», 2011.
4. Tipovoj projekt 3.503-14. Sbornye zhelezobetonnye prolyotnye stroeniya dlya avtodorozhnykh mostov [Standard project 3.503-14. Precast reinforced concrete spans for highway bridges]. Vyp. 5 Proletnye stroeniya bez diaphragm dlinoj 12, 15 i 18 m. Moskva : Soyuzdorproekt, 1974. 50 s.
5. GOST R 52748-2007. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Normativnye nagruzki, raschetnye shemy nagruzheniya i gabarity priblizheniya [GOST R 52748-2007 Public roads. Standard loads, design loading schemes and approach dimensions]. Moskva : ООО «Dorozhny inzhenerny tsentr», Rossijskaya akademiya transporta, 2008. 17 s.
6. Gibshman M.E., Popov V.I. Proyektirovanie transportnykh sooruzhenij [Design of transport structures] : учебник dlya vuzov. 2-e izd., pererab. i dop. Moskva : Transport, 1988. 447 s.
7. Semenets L.V. Prostranstvennyye raschety plitnykh mostov [Spatial calculations of slab bridges]. Kiev : Vishcha shkola, 1976, 164 s.
8. Rossiysky V.A., Nazarenko B.P., Slovinsky N.A. Primery proyektirovaniya sbornyx zhelezobetonnykh mostov [Examples of design of precast reinforced concrete bridges]. Kiev : Vishcha shkola, 1970. 520 s.

Информация об авторах

Ю.В. Тряпицын – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»;
В.О. Мельников – преподаватель кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»;
Д.А. Тряпкин – старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения».

Information about the authors

Y.V. Tryapitsin – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Building Structures, Buildings and Constructions;
V.O. Melnikov – Lecturer, Department of Building Structures, Buildings and Constructions;
D.A. Tryapkin – Senior Lecturer, Department of Building Structures, Buildings and Constructions.

Статья поступила в редакцию 26.02.2025; одобрена после рецензирования 26.06.2025; принята к публикации 26.06.2025.
The article was submitted: 26.02.2025; approved after reviewing: 26.06.2025; accepted for publication: 26.06.2025.

Научная статья
УДК 656.222.6
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-89-93

МОДЕЛЬ ВОЗВРАТА ПОЕЗДОПОТОКА С ПРИПОРТОВЫХ И ПОГРАНИЧНЫХ СТАНЦИЙ ВОСТОЧНОГО ПОЛИГОНА В УСЛОВИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ МАКСИМАЛЬНОЙ ВЫГРУЗКИ

Эсаулов Вячеслав Александрович^{1,2}

¹ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия, esaulov-87@mail.ru

² Центр управления перевозками на Восточном полигоне – структурное подразделение Центральной дирекции управления движением – филиала ОАО «РЖД», Хабаровск, Россия

Аннотация. Рост экспортного грузопотока в направлении Азиатско-Тихоокеанского региона ведет к увеличению вагонного потока, следующего в западном направлении после выполнения грузовых операций в портах Дальнего Востока. Проведен анализ перспективного поездопотока, возвращаемого с припортовых и пограничных станций восточного участка Транссибирской магистрали в условиях увеличения выгрузки экспортных грузов до уровня перерабатывающих способностей перегрузочных терминалов, примыкающих к припортовым железнодорожным станциям. Разработана модель возврата вагонов с учетом пропускной способности железнодорожного направления. Обоснована необходимость формирования соединенных поездов по технологиям виртуального и жесткого сцепления.

Ключевые слова: моделирование процесса перевозок, виртуально-сцепленные поезда, жестко-сцепленные поезда, пропускная способность, возврат вагонов

Original article

MODEL OF TRAIN FLOW RETURN FROM PORT AND BORDER STATIONS OF THE EASTERN POLYGON UNDER CONDITIONS OF MAXIMUM UNLOADING

Esaulov Viacheslav A.^{1,2}

¹ Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, esaulov-87@mail.ru

² Transportation Control Center at the Eastern Polygon – territorial branch of the Central Directorate of Traffic Control – branch of JSC «RZD», Khabarovsk, Russia

Abstract. The increase in export cargo flow in the direction of the Asia-Pacific region leads to the growth of return traffic, running in the western direction after the completion of cargo operations in the Far East ports. In this article, the analysis of the prospective train flow returning from port and border stations of the eastern section of the Trans-Siberian Railway is carried out in the conditions of increasing the unloading of export cargo to the level of processing capacities of transshipment terminals adjacent to ports' rail stations. A model of the return of wagons is developed taking into account the throughput capacity of a railway direction; the need for the formation of connected trains using virtual and rigid coupling technologies is substantiated.

Keywords: modeling of the transportation process, virtual-coupled trains, rigid-coupled trains, throughput capacity, return of wagons

Введение

Моделирование перевозочного процесса является неотъемлемой частью технологий, связанных с организацией движения, служит основой для поиска и дальнейшей эксплуатации технологических резервов, оптимизации использования имеющихся ресурсов, а также обоснования необходимости инфраструктурного развития. Оно позволяет консолидировать решения по применению современных инструментов, в том числе виртуального и жесткого сцепления, в единую технологическую систему.

В ряде случаев организация вождения соединенных грузовых поездов – это необходимая мера для реализации перевозочного процесса. Технологиям виртуального и жесткого сцепления посвяще-

ны труды многих исследователей [1–6].

Технология жесткого сцепления имеет ряд существенных преимуществ перед пропуском одиночных поездов:

– повышение пропускной способности железнодорожных направлений, в особенности в период длительных закрытий на двухпутных участках;

– рост эффективности использования бюджета времени технических станций за счет приема фактически двух поездов на один приемоотправочный путь;

– возможность повышения устойчивости и энергоэффективности графика движения посредством использования увеличенных межпоездных интервалов;

– улучшение бюджетного показателя «средний вес грузового поезда».

MODEL OF TRAIN FLOW RETURN FROM PORT AND BORDER STATIONS
OF THE EASTERN POLYGON UNDER CONDITIONS OF MAXIMUM UNLOADING

В качестве основных недостатков вождения соединенных поездов исследователями принято считать временные затраты, требуемые для объединения, а также увеличенную длину поезда и связанную с этим проблему пропуска приоритетных поездов вслед за соединенными. Одновременно с этим существует ряд ограничений по формированию жестко-сцепленных поездов.

Организация вождения грузовых поездов по технологии виртуального сцепления не имеет существенных барьеров по формированию, обладает маневренностью в части возможности вариативного разъединения и формирования при пропуске приоритетных категорий поездов, не требует временных затрат на объединение. При этом особо выделяющимся преимуществом технологии служит движение поездов в режиме автоведения и, как следствие, приближение траектории движения к нитке нормативного (вариантного) графика. Несмотря на короткий период реализации технологии на сети дорог, современными учеными проводится детальное изучение этого метода интервального регулирования посредством виртуального сцепления грузовых поездов [7–11].

В статье раскрыт частный случай, при котором выгрузка в портах Дальневосточного региона осуществляется на уровне перерабатывающих способностей перегрузочных терминалов, примыкающих к припортовым железнодорожным станциям. Раскрыты аспекты возврата поездопотока с припортовых и пограничных станций в сопоставлении с пропускной способностью железнодорожного направления и использования инструментов виртуального и жесткого сцепления.

Анализ перспективного поездопотока, возвращаемого с припортовых и пограничных станций восточного участка Транссиба

Для освоения предьявляемого грузопотока уже осуществлен ряд проектов в пределах Восточного полигона, в числе которых комплексная реконструкция железнодорожной станции Смоляниново, ввод в эксплуатацию тоннеля на перегоне Шкото-

во–Смоляниново, строительство третьего пути на перегоне Хабаровск I – Хабаровск II, а также удлинение ряда промежуточных станций. В результате проведенной работы показатель выгрузки припортовыми станциями Восточного полигона в течение 10 лет увеличен на 33,5 % (+1248 вагонов в сутки). На рис. 1 представлена динамика среднесуточной выгрузки экспортных грузов.

Одновременно с техническими инновациями на Восточном полигоне внедряются и технологические решения повышения провозной способности, в числе которых внедрение модели пропуска поездов массой 6300 т через горно-перевальный участок в направлении транспортного узла Находка усиленными локомотивами 4-секционного исполнения [12], использование современных инструментов интервального регулирования, организация тяжеловесного и длинносоставного движения, а также применение передовых методов диспетчерского управления.

Планомерное совершенствование технических и технологических возможностей Восточного полигона ведет к сокращению разрыва между фактической выгрузкой и перерабатываемыми способностями портов. Рассматривая возможности терминалов, примыкающих к станциям главного хода восточного участка Транссибирской магистрали, можно сделать вывод: суммарная перерабатывающая способность портов узла Находка, Владивосток, а также направления Уссурийск–Хасан составляет 7400 вагонов (табл. 1).

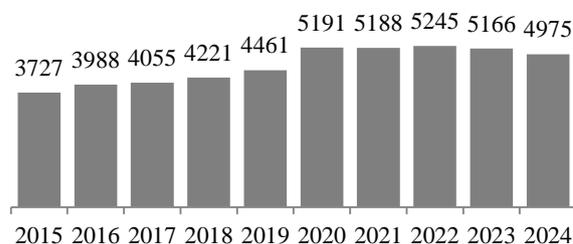


Рис. 1. Динамика среднесуточной выгрузки экспортных грузов припортовыми станциями Восточного полигона

Таблица 1

Перерабатывающие способности припортовых и пограничных станций восточного участка Транссиба

Станция	Перерабатывающая способность, ваг.	Станция	Перерабатывающая способность, ваг.
Находка-Восточная	2549	Угольная	140
Находка	680	Угловая	62
Мыс Астафьева	679	Гайдамак	110
Стрелковая	320	Гродеково	415
Первая Речка	168	Блюхер	157
Крабовая	342	Посъет	350
Рыбники	165	Камышовая	200
Владивосток	530	Хасан	50
Мыс Чуркин	281	Сухановка	30
Тихоокеанская	30	Смоляниново	142
		Итого	7400

Принимая в расчет составность грузового поезда, следующего с портов Восточного полигона в западном направлении к местам погрузки в количестве 71 вагона можно определить, что организация среднесуточной выгрузки на уровне перерабатывающей способности приведет к необходимости возврата 104 составов при имеющейся пропускной способности нечетного направления в количестве 92 поезда. Соответственно, при существующей возможности графика движения, превышение размеров движения составляет 12 ниток. Для обеспечения ритмичности возврата поездопотока необходимо решить как минимум три задачи:

- нормирования разборочного и транзитного поездопотока в нормативном графике движения грузовых поездов относительно сортировочной станции Хабаровск II. Постановка и решение задачи нормирования разборочного и транзитного поездопотока подробно описаны в [13];

- организации вождения грузовых поездов в режиме автоведения с целью приближения фактической траектории движения к расписанию, предусмотренному нормативным (вариантным) графиком движения. Цель вождения поездов в режиме автоведения эффективно реализуется посредством вождения виртуально-сцепленных поездов;

- уплотнения графика движения посредством организации вождения 12 соединенных транзитных поездов по технологии жесткого сцепления с последующим их пропуском через технические станции Восточного полигона без разъединения.

Модель возврата поездопотока с припортовых и пограничных станций восточного участка Транссиба

Принимая во внимание преимущества и недостатки технологии вождения соединенных грузовых по-

ездов, можно отметить, что необходимость реализации движения поездов в режимах виртуальной и жесткой сцепки в пределах Восточного полигона обусловлена размерами возврата вагонов с припортовых и пограничных станций, а также пропускной способностью, предусмотренной нормативным графиком движения грузовых поездов. На рис. 2 представлена модель возврата поездопотока с припортовых и пограничных станций, с учетом количества ниток графика для нечетного направления восточного участка Транссиба и перспективным вагонопотоком в условиях реализации выгрузки на уровне перерабатывающей способности терминалов.

Модель предполагает возврат 40 составов в виде разборочных поездов назначением на станцию Хабаровск II, 12 составов соединенных поездов в режиме жесткого сцепления и 40 составов одиночных поездов, которые целесообразно формировать в виртуально-сцепленные поезда, с учетом преимуществ реализации технологии. Для повышения устойчивости графика движения, приближения траектории поездов к нормативным ниткам графика, нивелирования погрешностей ручного управления целесообразно использование автоведения для всех поездов.

Для реализации модели необходимо строгое соответствие назначения возвращаемого грузового поезда, серии локомотива, а также остаточного времени до проведения очередных работ по циклу ТО-2 (табл. 2). В противном случае возникает риск нарушения ритмичности работы технических станций вследствие необходимости разъединения жестко-сцепленных поездов, непредусмотренной смены электровазона и, как следствие, завышение времени обработки грузовых поездов на приемоотправочных путях.



Рис. 2. Модель возврата поездопотока с припортовых и пограничных станций восточного участка Транссиба

**Соответствие характеристик возвращаемого потока грузовых поездов
с припортовых станций и подвязкой электровозов**

Характеристика потока	Серия локомотива	Остаточное время до проведения ТО-2
Поездопоток в переработку на станции Хабаровск II	4ЭС5К (2*2ЭС5К)	Не менее 35 ч
	3ЭС5К, 3ЭС5К с поосным распределением силы тяги	
Поездопоток соединенных транзитных поездов	3ЭС5К	Не менее 90 ч
	3ЭС5К с поосным распределением силы тяги	
Поездопоток одиночных транзитных поездов (в том числе по технологии виртуального сцепления)	3ЭС5К	Не менее 90 ч
	3ЭС5К с поосным распределением силы тяги	

Выводы

Современные технологические инструменты организации движения грузовых поездов, в том числе использование технологий виртуального и жесткого сцепления, в настоящее время позволяют реализовывать потребный уровень перевозок в направлении портов Дальнего Востока, а также возврат поездопотока в западном направлении. Моделирование транспортных процессов служит основой для использования технологических резервов.

В статье представлена укрупненная модель организации движения грузовых поездов, следующих с припортовых и пограничных станций восточного участка Транссибирской магистрали, с учетом пропускной способности направления. Модель предполагает возврат 40 разборочных поездов для сор-

тировочной станции Хабаровск II, 12 транзитных поездов, следующих по технологии жесткого сцепления, и 40 транзитных одиночных поездов, следующих, в том числе, по технологии виртуального сцепления. Применение модели целесообразно в условиях организации выгрузки (передачи) на уровне перерабатывающих способностей перегрузочных терминалов и пограничных переходов. Использование модели позволяет обеспечивать ритмичную работу припортовых станций Восточного полигона и сортировочной станции Хабаровск II посредством своевременного освобождения приемо-отправочных путей припортовых станций и равномерного подвода разборочных и транзитных поездов к сортировочной станции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сирина Н.Ф., Раевская П.Е. Выбор оптимального варианта формирования и регулирования соединенных поездов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1(61). С. 53–61.
2. Каимов Е.В., Оленевич А.А. Усиление пропускных мощностей Восточного полигона за счет увеличения количества длинносоставных поездов // 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. 44–47.
3. Фрибус А.А. О влиянии пропуска поездов повышенной массы и длины на технологические и конструктивные параметры приемоотправочных парков железнодорожных станций // Наука и молодежь XXI века : материалы Регионального форума. В 2 ч. Новосибирск, 13–23 ноября 2023 г. Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2024. С. 17–21.
4. Климова Е.В. Методика оценки эффективности формирования и пропуска соединенных грузовых поездов на участках и полигонах железных дорог // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2015. № 4. С. 19–23.
5. Сотников Е.А., Холодняк П.С. Изменения пропускной и провозной способностей высокозагруженных направлений при организации движения соединенных поездов на постоянной основе // Вестник ВНИИЖТ. 2019. Т. 78, № 5. С. 259–265.
6. Сокращение срока доставки грузов за счет организации движения соединенных грузовых поездов в период представления «окон» / О.В. Москвичев, В.И. Александров, Е.В. Александров, Е.А. Мищенко // Наука и образование транспорту. 2018. С. 95–97.
7. Бушуев С.В., Гундырев К.В., Голочалов Н.С. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки // Автоматика на транспорте. 2021. Т. 7, № 1. С. 7–20.
8. Оленевич В.А., Упырь Р.Ю., Антипина А.А. Эффективное внедрение интервального регулирования движения поездов по системе «виртуальная сцепка» на участке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. Т. 66, № 2. С. 182–189.
9. Бушуев С.В., Попов А.Н. Расстояние сближения поездов при организации движения по технологии виртуальной сцепки // Наука и образование транспорту. 2020. С. 273–275.
10. Климова Е.В. Пропускная и провозная способность перегонов при реализации технологии «виртуальная сцепка» грузовых поездов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2020. № 3(47). С. 53–64.

МОДЕЛЬ ВОЗВРАТА ПОЕЗДОПОТОКА С ПРИПОРТОВЫХ И ПОГРАНИЧНЫХ СТАНЦИЙ ВОСТОЧНОГО ПОЛИГОНА В УСЛОВИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ МАКСИМАЛЬНОЙ ВЫГРУЗКИ

11. Эффективность пропуска спаренных грузовых поездов / В.А. Эсаулов, Б.И. Давыдов, К.Н. Никитенко, А.Г. Лазарев // Наука и техника транспорта. 2022. № 2. С. 69–78.
12. Мединцев Е.В., Эсаулов В.А. Пропуск поездов через лимитирующий участок // Железнодорожный транспорт. 2024. № 12. С. 21–24.
13. Эсаулов В.А., Мединцев Е.В. Методика моделирования возврата подвижного состава с припортовых и пограничных станций на основе решения транспортной задачи линейного программирования // Наука и техника транспорта. 2025. № 1.

REFERENCES

1. Sirina N.F., Raevskaya P.E. Vybor optimal'nogo varianta formirovaniya i regulirovaniya soedinennykh poezdov [Selection of the optimum option of forming and regulating combined trains] // Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. № 1(61). S. 53–61.
2. Kaimov E.V., Olencevich A.A. Usilenie propusknykh moshchnostej Vostochnogo poligona za schet uvelicheniya kolichestva dlinnosostavnykh poezdov [Strengthening throughput capacities of the Eastern polygon by means of increasing the quantity of long trains] // Upravlenie ekspluatatsionnoy rabotoy na transporte (UERT-2024) : sbornik trudov II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 15–16 oktyabrya 2024 g. Sankt-Peterburg : Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2024. S. 44–47.
3. Fribus A.A. O vliyaniy propuska poezdov povyshennoy massy i dliny na tekhnologicheskie i konstruktivnye parametry priemopravochnykh parkov zheleznodorozhnykh stantsij [On the influence of the throughput of trains with increased mass and length on technological and constructive parameters of receiving-and-dispatching parks of railway stations] // Nauka i molodezh' XXI veka : Materialy Regional'nogo foruma. V 2 ch. Novosibirsk, 13–23 noyabrya 2023 g. Novosibirsk : Sibirskiy gosudarstvennyy universitet putej soobshcheniya, 2024. S. 17–21.
4. Klimova E.V. Metodika ocenki effektivnosti formirovaniya i propuska soedinennykh gruzovykh poezdov na uchastkah i poligonah zheleznykh dorog [Methods of efficiency evaluation of forming and throughput of combined cargo trains on railway sections and polygons] // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2015. № 4. S. 19–23.
5. Sotnikov E.A., Holodnyak P.S. Izmeneniya propusknoy i provoznoy sposobnostej vysokozagruzhenykh napravleniy pri organizatsii dvizheniya soedinennykh poezdov na postoyannoj osnove [Changes of throughput and carrying capacities of highly intensive directions when organizing the traffic of combined trains on the constant basis] // Vestnik VNIIZhT. 2019. T. 78, № 5. S. 259–265.
6. Sokrashchenie sroka dostavki gruzov za schet organizatsii dvizheniya soedinennykh gruzovykh poezdov v period predostavleniya «okon» [Shortening the cargoes delivery time by organizing the traffic of combined freight trains during the period of providing «windows»] / O.V. Moskvichev, V.I. Aleksandrov, E.V. Aleksandrov, E.A. Mishchenko // Nauka i obrazovanie transportu. 2018. S. 95–97.
7. Bushuev S.V., Gundyrev K.V., Golochalov N.S. Povyshenie propusknoy sposobnosti uchastka zheleznoj dorogi s primeneniem tekhnologii virtual'noj scepki [Increase of the throughput capacity of a railroad section with applying the technology of virtual coupling] // Avtomatika na transporte. 2021. T. 7, № 1. S. 7–20.
8. Olencevich V.A., Upry' R.Yu., Antipina A.A. Effektivnoe vnedrenie interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov po sisteme «virtual'naya scepka» na uchastke [Efficient introduction of interval regulating of trains' traffic based on the «virtual coupling» system at a section] // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie. 2020. T. 66, № 2. S. 182–189.
9. Bushuev S.V., Popov A.N. Rasstoyanie sblizheniya poezdov pri organizatsii dvizheniya po tekhnologii virtual'noj scepki [Opposing trains' approach distance when organizing the traffic based on the virtual coupling technology] // Nauka i obrazovanie transportu. 2020. S. 273–275.
10. Klimova E.V. Propusknaya i provoznaya sposobnost' peregonov pri realizatsii tekhnologii «virtual'naya scepka» gruzovykh poezdov [Throughput and carrying capacity of spans when realizing the virtual coupling technology for freight trains] // Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2020. № 3(47). S. 53–64.
11. Effektivnost' propuska sparenykh gruzovykh poezdov [Efficiency of throughput of paired cargo trains] / V.A. Esaulov, B.I. Davydov, K.N. Nikitenko, A.G. Lazarev // Nauka i tekhnika transporta. 2022. № 2. S. 69–78.
12. Medincev E.V., Esaulov V.A. Propusk poezdov cherez limitiruyushchij uchastok [Throughput of trains through a limiting section] // Zheleznodorozhnyy transport. 2024. № 12. S. 21–24.
13. Esaulov V.A., Medincev E.V. Metodika modelirovaniya vozvrata podvizhnogo sostava s priportovykh i pogranichnykh stantsij na osnove resheniya transportnoy zadachi lineynogo programmirovaniya [Methods of modeling of the rolling stock return from port and border stations on the basis of solving a transport task of linear programming] // Nauka i tekhnika transporta. 2025. № 1.

Информация об авторе

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 author

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.

Статья поступила в редакцию 07.05.2025; одобрена после рецензирования 14.07.2025; принята к публикации 14.07.2025.
The article was submitted: 07.05.2025; approved after reviewing: 14.07.2025; accepted for publication: 14.07.2025.

Научная статья
УДК 656.073.7
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-94-101

ДОРОЖНЫЙ СЮРВЕЙ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ НЕГАБАРИТНЫХ ГРУЗОВ

Яковлева Алена Тимофеевна

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия, yakovlevaaa17@yandex.ru

Аннотация. Перевозка крупногабаритных тяжеловесных грузов (КТГ) автомобильным транспортом – один из наиболее сложных видов транспортных операций. Рассматриваются особенности организации таких перевозок, включая проведение дорожного сюрвея как ключевого этапа подготовки маршрута. Представлены методологические подходы к оценке состояния дорожной инфраструктуры, обследованию инженерных сооружений и анализу возможности транспортировки КТГ. Выявлены основные препятствия, возникающие на маршруте, и предложены рекомендации по их устранению.

Ключевые слова: дорожный сюрвей, перевозка КТГ, дорога, препятствия, рекомендации по устранению, техническое задание

Original article

ROAD SURVEY FOR THE ORGANIZATION OF TRANSPORTATION OF OVERSIZED GOODS

Yakovleva Alyona T.

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, yakovlevaaa17@yandex.ru

Abstract. Transportation of bulky heavy goods (BHG) by road is one of the most complex types of transportation operations. The article discusses the specifics of organizing such transportation, including conducting a road survey as a key stage in route preparation. Methodological approaches to assessing the condition of the road infrastructure, surveying engineering structures, and analyzing the possibility of transporting BHG are presented. The main obstacles encountered on the route have been identified and recommendations for their elimination have been proposed.

Keywords: road survey, BHG transportation, road, obstacles, recommendations for elimination, performance specification

Крупногабаритные тяжеловесные перевозки можно назвать наиболее трудоемким из всех возможных видов перевозок. Автомобильные перевозки крупногабаритного тяжеловесного груза (КТГ) не являются исключением. Сложность заключается не только в габаритах и массе данных грузов: многие транспортные средства располагают необходимыми техническими возможностями для перевозки этой группы грузов [1]. Тем не менее перевозки КТГ автомобильным транспортом входят в перечень развивающихся. На автотранспорт приходится около 70 % от всех совершающихся перевозок «под ключ», в том числе перевозок КТГ [2].

По данным Росстата за 2020–2024 гг. можно сделать вывод о росте грузооборота автомобильных перевозок [17–20] (рис. 1).

В 2024 г. в России наблюдалось увеличение общего количества грузоперевозок на 6,5 % по сравнению с 2023 г. Объем перевозок железнодорожным транспортом снизился на 4,2 % и составил 1,19 млрд т [5]. Следовательно, автомобили – лидирующий вид транспорта в наземных перевозках.

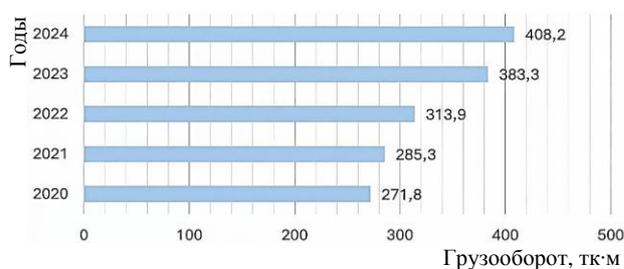


Рис. 1. Грузооборот автотранспорта за 2020–2024 гг.

До пандемии коронавируса в России можно было выделить тенденцию роста перевозок КТГ по стране и на международном уровне. Отечественные компании заключали долгосрочные контракты на поставку оборудования и техники для разных отраслей промышленности. В стране наблюдается ежегодное увеличение объемов производства в промышленности, а также в энергетической, добывающей и обрабатывающей отраслях более чем на 2–4 % [3]. Следствием этого стало увеличение поставок оборудования и специализированной техники для обеспечения работы модернизированных мощностей. Далее по-

следовал рост спроса на перевозки КТГ специальной техники, промышленного оборудования и других «сложных» грузов.

Перевозки КТГ играют важную роль в развитии промышленности и экономики страны. Транспортная система значительно влияет на производительность и конкурентоспособность отечественных производств. Такие отрасли промышленности, как судостроение, металлургия, нефтепереработка, энергетика и многие другие, требуют наличия услуг по транспортировке КТГ [6].

Согласно ПДД, «Перевозка тяжеловесных и опасных грузов, движение транспортного средства, габаритные параметры которого с грузом или без груза превышают по ширине 2,55 м (2,6 м для рефрижераторов и изотермических кузовов), по высоте 4 м от поверхности проезжей дороги, по длине (включая один прицеп) 20 м, либо движение ТС с грузом, выступающим за заднюю точку габарита транспортного средства более чем на 2 м, а также движение автопоездов с двумя и более прицепами осуществляются в соответствии со специальными правилами» [8].

Неделимый тяжеловесный груз может также обладать крупногабаритными характеристиками и при транспортировке выходить за пределы установленных норм. Авторы И.Н. Пугачёв и Ю.И. Куликов предлагают закрепить в нормативных документах следующее определение: «Тяжеловесный и/или крупногабаритный груз – это штучный неделимый груз, который невозможно разобрать на составные части по техническим или технологическим причинам и который при погрузке на транспортное средство превышает допустимые весогабаритные параметры» [22–24].

Перевозка подобных грузов по автодорогам требует оформления специального разрешения и пропуска на движение транспортного средства, подаваемого перевозчиком в виде заявления. Дополнительно согласовываются маршрут, способ сопровождения и особые условия перевозки [22–24]. На данном этапе в Министерстве транспорта Российской Федерации разработаны Правила перевозки грузов, в том числе и КТГ, которые отражены в постановлении Правительства РФ от 09.01.2014 г. № 12 с 1 января 2015 г. [4].

Таким образом, организация перевозки КТГ – важная составляющая развития экономики страны. Планирование перевозки КТГ имеет собственную специфику, заключающуюся во множестве нюансов работы с ними и подготовительных мероприятиях к перевозке. Необходимым этапом планирования и выполнения перевозки КТГ является дорожный сюрвей.

Дорожный сюрвей – обследование дороги и поиск оптимального маршрута для перевозки того или иного груза. В ходе проведения сюрвея обследуется планируемый маршрут. Обследование является основой для определения предполагаемых инфраструктурных изменений, изменений инженерных сооружений и коммуникаций, находящихся на

маршруте следования.

Вследствие всего вышесказанного актуальным представляется определение методики выполнения дорожного сюрвея для развития сферы перевозок КТГ, улучшения комплексного логистического обслуживания данного вида перевозок, а также дальнейшего оказания позитивного влияния на модернизацию отечественных предприятий и развития различных отраслей промышленности.

Цель исследования: методика выполнения дорожного сюрвея для молодых специалистов в сфере перевозок КТГ, которая будет поэтапно и наглядно объяснять эффективное выполнение дорожного сюрвея и уберечь молодых специалистов от некорректных действий и ошибок.

Дорожный сюрвей включает мероприятия для определения возможности проезда КТГ по предполагаемому маршруту средствами топографической съемки, геологических изысканий дорожного полотна, определения мощности и высоты линий электропередач над автодорогой, расчета несущей способности мостовых инженерных сооружений, таких как байпасы, путепроводы, мосты и т.д. Дорожный сюрвей – неотъемлемая часть обследования, позволяющего определить оптимальный маршрут для перемещения провоза КТГ от точки А к точке Б. В зависимости от технического задания можно выделить два вида дорожного сюрвея: поверхностный и более детальный. Поверхностный сюрвей имеет цель определить препятствия на пути следования и зафиксировать их, детальный сюрвей дополнительно включает в себя представление рекомендаций по устранению этих препятствий или иных нарушений, повреждений в соответствии с техническими характеристиками транспортного средства – автопоезда.

Методика выполнения дорожного сюрвея представлена в виде схемы выполнения дорожного сюрвея при перевозке негабаритных грузов (рис. 2). Более подробно остановимся на каждом этапе дорожного сюрвея.

Осмотр дороги на наличие сложных участков, деформаций, повреждений. Визуальный осмотр – один из приемов оценки состояния дороги, являющийся методом упрощенного анализа. Визуальный осмотр позволяет определить повреждения, деформации поверхности дорожного полотна, коммуникаций и выявить отклонения от норм [8]. Специалист по перевозкам КТГ может не иметь высокой квалификации в области диагностики автодорог и инженерных коммуникаций; ему необходимо зафиксировать предполагаемое повреждение и отразить в заключении сюрвея, в котором также необходимо указать восстановление несущей способности дорожного полотна под нагрузку автопоезда, планируемого к перевозке. В зависимости от условий технического задания возможно представить рекомендации по устранению тех или иных дефектов.

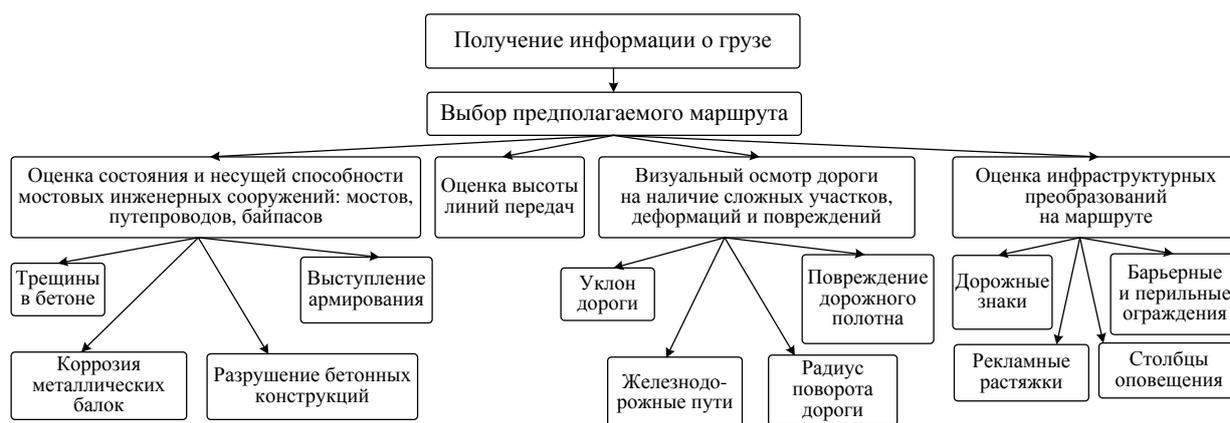


Рис. 2. Схема выполнения дорожного сюрвея при перевозке негабаритных грузов

В случае если обнаружены дефекты или повреждения дорожного полотна, необходимо провести мероприятия по обследованию несущей способности дорожного полотна и в дальнейшем – по его ремонту и/или укреплению, если это требуется. При наличии на пути следования пересечения перекрестков, заездов, съездов и другого рекомендацией может стать проведение топографической съёмки местности.

К сложным участкам дороги относятся не только повреждения дорожного полотна, также это могут быть лежащие на пути следования железнодорожные пути, уклон или радиус поворота дороги.

Железнодорожные пути подразделяются на регулируемые и нерегулируемые, электрифицированные и неэлектрифицированные. При выявлении условий проезда железнодорожных путей сообщением определяющим моментом является наличие высоковольтного несущего провода контактной линии. В случае детального сюрвея, если высоковольтный несущий провод контактной линии имеет длину более 6 м, то необходимы мероприятия по отключению и снятию контактной линии электропередачи железной дороги. Также при перевозке сверхтяжелого груза может понадобиться разработка проекта по укреплению железнодорожного переезда для пересечения автопоезда с КТГ.

Уклон дороги – это изменение уровня дорожного полотна относительно окружающего рельефа [12]. Вследствие весогабаритных характеристик КТГ перевозка данного груза может быть затруднена уклоном в зависимости от высоты груза и его центра тяжести [12]. Уклон дороги наиболее важен при перевозке сверхгабаритного груза высотой более 5 м. При наличии в техническом задании исходной информации о технических возможностях автопоезда и его технических характеристиках станет реально определить критический угол уклона автодороги для данного автопоезда с КТГ и перспектива проезда. В случае если уклон дороги окажется критическим, в заключении следует дать рекомендацию по прове-

дению мероприятия по его уменьшению.

Оценка радиуса поворота дороги. В случае, если в техническом задании отсутствуют технические характеристики автопоезда, необходимо провести топографическую съёмку местности и замеры всех перекрестков и ширины проезжей части. Если же технические характеристики автопоезда известны, появляется возможность после замеров смоделировать возможность проезда автопоезда на определенной местности. В случае если автопоезд не «вмещается» в поворот, следует провести мероприятия по инфраструктурному преобразованию: расширить дорожное полотно, сформировать заезд на обочину и др.

Оценка состояния и несущей способности инженерных мостовых сооружений: мостов, путепроводов, байпасов. К возможным дефектам инженерных мостовых сооружений относят трещины в бетоне, коррозию металлических балок, выступление армирования, разрушение бетонных конструкций, разрушение амортизирующих механизмов, опорных стенок, прогибы стенок балок и др. [9]. Наличие таких деформаций может существенно снижать грузоподъемность инженерных мостовых сооружений. Данные повреждения рекомендуется фиксировать и проводить замеры глубины и ширины трещин с помощью измерительных приборов (линейки). При наличии информации на несущих балках инженерных мостовых сооружений необходимо отразить данную информацию в заключении. К рекомендациям по восстановлению несущей способности мостового сооружения относится проведение обследования несущей способности и дальнейшие мероприятия по ее восстановлению.

Оценка инфраструктурных преобразований на маршруте. Вследствие больших габаритов груза и транспортного средства может понадобиться изменение дорожной инфраструктуры: барьерного и перильного ограждения, мостовых переходов, ферм, рекламных растяжек, столбов освещения, дорожных знаков и т.д. В поверхностном сюрвее препятствия фиксируются, в детальном как рекомендация по устранению указывается расширение дорожного

полотна за счет демонтажа инфраструктурных единиц с последующим восстановлением или поиск объезда.

Оценка высоты линий электропередачи (ЛЭП) и эстакад подразумевает необходимость установить возможность проезда КТГ под ЛЭП. Безопасное расстояние между ЛЭП и грузом зависит от напряжения электроустановки [10]. Допустимые значения до токоведущих частей, находящихся под напряжением, отражены в таблице.

Таблица

Допустимые значения до токоведущих частей, находящихся под напряжением

Напряжение ЛЭП, кВ	Расстояние, м	
	Минимальное	Минимальное, измеряемое техническими средствами
До 1	1,5	1,5
Свыше 1 до 20	2,0	2,0
Свыше 20 до 35	2,0	2,0
Свыше 35 до 110	3,0	4,0
Свыше 110 до 220	4,0	5,0
Свыше 220 до 400	5,0	7,0
Свыше 400 до 750	9,0	10,0
Свыше 750	10,0	11,0

В случае если расстояние не удовлетворяет условиям нормативных актов или провоз КТГ является невозможным вследствие недостаточной высоты, это необходимо зафиксировать, и в рекомендациях по устранению препятствия указать увеличение высоты столбов или их демонтаж с последующим восстановлением и подключением к сети. При оценке высоты ЛЭП необходимо учитывать температуру окружающей среды: вследствие того, что провод ЛЭП в основе – металлическое изделие, высокая температура может повлиять на его прогибание, из-за чего расстояние до земли сокращается. Данные условия определения температуры особенно относятся к ЛЭП мощностью от 220 вольт [21].

После завершения всех этапов проведения сюрвея формируется техническое заключение об обследовании маршрута, в котором перечислены все препятствия, повреждения обследуемых коммуникаций, встречающихся на пути следования, их описание, фотографии и методы устранения препятствий в зависимости от технического задания. Возможно представление рекомендаций по решению инфраструктурных преобразований и устранение повреждений инженерных сооружений или мероприятий по их демонтажу или объезду. Каждое препятствие необходимо проанализировать, чтобы определить оптимальную методику по его устранению. Заключение о сюрвее является важным этапом при подготовке к разработке проекта организации и безопасности дорожного движения для осуществления провозки КТГ по предполагаемому маршруту.

Авторский опыт выполнения дорожного

сюрвея рассмотрим на примере следующего маршрута. Пункт отправления: Сахалинская область, р-н Углегорский, пгт. Шахтерск, ул. Ленина, д. 16а (Солнцевский угольный разрез) – пункт назначения: Сахалинская область, р-н Углегорский, пгт. Шахтерск, ул. Портовая, д. 10 (Угольный морской порт Шахтерск).

Объект перевозки: порталная часть стакера-реклаймера – специализированного транспортирующего механизма непрерывного действия, предназначенного для забора и погрузки угля. Данное оборудование используется для упорядоченного размещения инертных материалов на производственных и складских площадках, а также подачи сыпучих грузов на причальный конвейер. На рис. 3 представлен стакер-реклаймер, на рис. 4 – его порталная часть.



Рис. 3. Стакер-реклаймер



Рис. 4. Портальная часть стакера-реклаймера

Перевозимый объект относится к категории круп-

ногабаритных и тяжеловесных грузов. Основные габаритные характеристики: высота – 5,3 м; ширина – 13,5 м; масса – 150 т. Конструктивная особенность: сварное соединение элементов портала, исключающее возможность транспортировки по частям и требующее детальной проработки маршрута с учетом ограничений дорожной инфраструктуры.

Проведенный дорожный сюрвей носил поверхностный характер и основывался на визуальном осмотре маршрута с использованием измерительных приборов. Основная цель обследования – определение возможности безопасной транспортировки КТГ. В рамках обследования маршрута были выполнены следующие мероприятия:

- определение пропускной способности маршрута;
- замер ширины дорожного полотна, расстояния между бордюрами и перильными ограждениями, высоты линий электропередачи;
- анализ состояния инженерных мостовых сооружений на предмет их несущей способности;
- определение потенциальных проблемных участков.

Замеры высоты ЛЭП и ширины дорожного полотна проводились с применением измерительного оборудования (рис. 5), в том числе ультразвукового измерителя Даль-2.

На рис. 6 представлено измерение высоты ЛЭП ультразвуковым измерителем Даль-2.



Рис. 5. Измерительные приборы: а – курвиметр; б – лазерная линейка; в – ультразвуковой измеритель Даль-2



Рис. 6. Измерение высоты ЛЭП

Протяженность исследуемого маршрута составила 28 км.

В ходе осмотра были выявлены следующие основные препятствия

1. Инженерные мостовые сооружения: на ряде объектов обнаружены дефекты в виде оголения арматуры несущих балок, что потенциально снижает их несущую способность. Рекомендовано дополнительное обследование и расчет допустимой нагрузки.

2. Линии электропередач (ЛЭП): зафиксированы участки с недостаточным габаритом по высоте. Рекомендован либо подъем проводов, либо их временный демонтаж.

3. Узкие повороты: отдельные участки маршрута характеризуются ограниченной шириной проезжей части, что делает невозможным безопасное маневрирование автопоезда с КТГ. Даны рекомендации по локальному расширению дорожного полотна.

4. Столбы освещения, перильные и бордюрные ограждения: препятствия к прохождению груза по ширине. Рекомендован временный демонтаж с последующим восстановлением инфраструктуры.

На основе проведенного дорожного сюрвея составлен перечень препятствий, требующих устранения перед выполнением негабаритной перевозки. Внесены рекомендации по корректировке инфраструктуры, включая подъем линий электропередач, расширение узких участков и временный демонтаж ограждений. Полученные результаты подтверждают актуальность предварительного обследования маршрутов при организации перевозки негабаритных грузов. Дорожный сюрвей является ключевым инструментом обеспечения безопасности и эффективности логистических операций в данной сфере.

Инновационные методы выполнения дорожного сюрвея

В связи со стремительным развитием науки и технологий методы проведения дорожного сюрвея также становятся более совершенными и прогрессивными. Рассмотрим инновационные методы выполнения дорожного сюрвея на основе технологий лазерного сканирования и с применением летательных аппаратов.

В зависимости от того, какой объект нужно исследовать (например, инженерные мостовые сооружения, городские или региональные дороги), используются разные методы сканирования. Среди них: классическое наземное лазерное сканирование (НЛС), мобильное лазерное сканирование (МЛС), воздушное лазерное сканирование (ВЛС), съёмка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и аэрофотосъёмка (АФС) [14].

Для дорожного сюрвея наиболее подходящим методом является мобильное лазерное сканирование (МЛС). В условиях городской застройки часто

это единственный возможный вариант, поскольку пролёт других устройств может быть запрещён по соображениям безопасности или другим причинам. МЛС позволяет автоматически обнаруживать препятствия на пути, не требуя участия специалиста, однако, у него есть существенный недостаток – высокая стоимость. Оборудование для МЛС стоит в четыре раза дороже, чем комплект для аэрофото-съемки, а стоимость съемки методом МЛС в шесть раз выше, чем стоимость работ с БПЛА [15].

Интерес к мобильному лазерному сканированию и публикации на эту тему в России появились в 2010-х гг., что может быть связано с высокой стоимостью оборудования и самого сканирования. Из-за ограничений на ввоз оборудования от западных производителей в современных условиях услуги мобильного лазерного сканирования стали ещё дороже, возросли риски и издержки при ремонте аппаратуры [14].

В европейских странах интерес к сканированию возник раньше, что объясняется более высоким уровнем технологичности в организации транспортных систем и доступностью необходимого оборудования [16]. Авторы некоторых публикаций подчёркивают важность предварительной обработки данных сканирования, включающую в себя первичную классификацию точек, удаление шумов, привязку данных к нужной системе координат (если это необходимо) и выравнивание информации относительно маркеров на местности.

Таким образом, инновационные методы проведения дорожного сюрвея обладают высоким потенциалом для развития в сфере негабаритных перевозок, однако, их повсеместное внедрение ограничено высокой стоимостью оборудования и сервисного обслуживания. В связи с этим на данный момент основным методом выполнения дорожного сюрвея остаётся традиционное обследование маршрута, включающее визуальный анализ, топографическую съемку и обследование объектов инфраструктуры.

Заключение

Дорожный сюрвей – неотъемлемый этап подготовки маршрута при перевозке КТГ. Комплексное обследование дорожной инфраструктуры позволяет минимизировать риски, связанные с транспортировкой негабаритных грузов, и повысить эффективность логистических процессов.

Перспективным направлением исследований является разработка автоматизированных систем мониторинга маршрутов, использование дронов для обследования местности, а также внедрение цифровых моделей транспортных коридоров для оптимизации перевозок КТГ.

Перевозка негабаритных грузов играет ключевую роль в развитии экономики, обеспечивая транспортировку крупногабаритного оборудования и техники, необходимых для функционирования промышленного, энергетического и строительного секторов. Планирование данного вида перевозок представляет собой сложный и многокомпонентный процесс, требующий тщательного анализа маршрута и оценки возможных рисков.

Одним из ключевых этапов подготовки к транспортировке КТГ является проведение дорожного сюрвея. Данный этап позволяет определить возможность безопасного провоза груза по запланированному маршруту, а также выявить и минимизировать потенциальные препятствия. Основная задача сюрвея – не только определение маршрута, но и разработка необходимых мер для обеспечения безопасной транспортировки, включая инфраструктурные преобразования и согласование маршрута с регулирующими органами.

Отсутствие предварительного обследования маршрута может привести к значительным финансовым потерям, связанным с повреждением груза, разрушением дорожного покрытия, инженерных сооружений и коммуникационных объектов. Таким образом, дорожный сюрвей является критически важным этапом в организации перевозки КТГ, позволяющем минимизировать риски и повысить эффективность логистических процессов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Троицкая Н.А. Инновационный подход к проектированию системы транспортировки крупногабаритных тяжеловесных грузов : учебник. Москва : КНОРУС, 2022. 234 с. (Бакалавриат и магистратура).
2. Пенькова А.О. Главные тенденции на российском рынке грузовых перевозок в 2019 г. // Молодой ученый. 2020. № 7(297). С. 175–178. URL : <https://moluch.ru/archive/297/67454/> (дата обращения: 16.02.2025).
3. Пашкова Т.Н., Филиппова Н.А., Поздняк А.Н. Международная перевозка крупнотоннажных грузов на примере перевозки компонентов ветроэнергетической установки // Мир транспорта. 2021. Т. 19, № 1. С. 156–173. doi:<https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-1-156-173>
4. Троицкая Н.А., Шилимов М.В. Организация перевозок специфических видов грузов : учебное пособие. 2-е изд., испр. Москва : КНОРУС, 2016. 240 с. (Бакалавриат).
5. Росстат. Информация о социально-экономическом положении России : статистический бюллетень. 2024. URL : <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/osn-12-2024.pdf> (дата обращения: 20.02.2025).
6. Имамединов Р.Х. Организация международных перевозок крупногабаритных и тяжеловесных грузов по территории Российской Федерации : автореферат дис. ... кандидата экономических наук : 08.00.05 / Р.Х. Имамединов ; Государственный университет управления. Москва, 2003. 24 с.
7. Правила дорожного движения Российской Федерации. Раз. 23.5. Специальные правила : утв. постановлением Правительства РФ от 23.10.1993 г. № 1090.

8. Сапрыкин С.С., Пак В.В., Дегтярев Д.А. Методы диагностики состояния дорожного полотна // Молодой ученый. 2022. № 15(410). С. 52–56. URL : <https://moluch.ru/archive/410/90352/> (дата обращения: 20.02.2025).
9. Боровиков А.Г., Картопольцев В.М. Оценка грузоподъемности сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов // Вестник ТГАСУ. 2013. № 4(41). URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-gruzopodemnosti-stalezhelezo-betonnyh-proletnyh-stroeniy-avtodorozhnyh-mostov> (дата обращения: 24.02.2025).
10. Об утверждении правил по охране труда при эксплуатации электроустановок : приказ Минтруда России от 24.07.2013 г. № 328н (ред. от 15.11.2018) // Российская газета. 2013. № 285. URL : <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=282614> (дата обращения: 25.02.2025).
11. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Гл. 2.4. Воздушные линии электропередачи напряжением до 1 кВ : утв. приказом Минэнерго РФ от 20.05.2003 г. № 187. URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200031977> (дата обращения: 18.02.2025).
12. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85 : утв. приказом Минрегиона РФ от 30.06.2012 г. № 266. Введ. 01.01.2013. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095524> (дата обращения: 25.02.2025).
13. СНиП 2.05.02-85. Автомобильные дороги : утв. Постановлением Госстроя СССР от 17.12.1985 г. № 233. Введ. 01.07.1986. URL : <https://docs.cntd.ru/document/5200258> (дата обращения: 25.02.2025).
14. Гребенюк Е.А., Ротков С.И. Мобильное лазерное сканирование городских дорог: оценка трудозатрат для получения качественного результата // Графикон : труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению. 19–21 сентября. Москва, 2023. С. 703–709
15. Брынь М.Я., Баширова Д.Р. Сравнительная оценка эффективности мобильного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов при съемке автомобильных дорог // Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 3. С. 20–27. doi:<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-3-20-27>
16. Технологии BIM, онтологий и управления активами на автомобильных дорогах Европы / О.Н. Покусаев [и др.] // International journal of open information technologies. 2020. Т. 8, № 6. С. 108–134.
17. Транспорт России : информационно-статистический бюллетень / Министерство транспорта Российской Федерации. 2022. URL : https://mintrans.gov.ru/storage/app/media/files/3_bulleted_transport_russia.pdf (дата обращения: 21.02.2025).
18. Транспорт России : информационно-статистический бюллетень / Министерство транспорта Российской Федерации. URL : <https://mintrans.gov.ru/documents/7/13259> (дата обращения: 19.02.2025).
19. Транспорт России : информационно-статистический бюллетень. Январь-декабрь 2021 г. / Министерство транспорта Российской Федерации. URL : <https://mintrans.gov.ru/file/476806> (дата обращения: 19.02.2025).
20. О текущей ситуации в Российской экономике. Итоги 2024 / Министерство экономического развития Российской Федерации. 2024. URL : https://www.economy.gov.ru/material/file/195754c7897bff1c50dc164890f91407/o_tekushchey_situacii_v_rossiyskoj_ekonomike_itogi_2024_goda.pdf (дата обращения: 19.02.2025).
21. ГОСТ 12.1.051–90. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Расстояния безопасности до токоведущих частей, находящихся под напряжением : утв. Постановлением Госстандарта СССР от 29.12.1990 г. № 3568 : введ. 01.01.1992. Москва : Изд-во стандартов, 1991. 12 с.
22. Проблема эквивалентности нормативных документов по ограничению движения грузовых автотранспортных средств и требований к несущей способности автомобильных дорог / И.Н. Пугачев, Ю.И. Куликов, С.А. Казарбина, А.Е. Васильев // Мир дорог. 2015. № 86. С. 14–16.
23. Пугачев И.Н., Куликов Ю.И., Казарбин А.В. Проблемы терминологии в нормативных документах автомобильно-дорожной отрасли // Мир измерений. 2009. № 10(104). С. 47–50.
24. Пугачев И.Н., Куликов Ю.И. Необходим единый стандарт по нормативной нагрузке для автотранспортных средств // Транспортное строительство. 2010. № 4. С. 20–22.

REFERENCES

1. Troitskaya N.A. Innovatsionny podhod k proyektirovaniyu sistemy transportirovki krupnogabaritnyh tyazhelovesnyh грузов [An innovative approach to the design of a system for transporting bulky heavy goods] : учебник. Москва : KNORUS, 2022. 234 s. (Bakalavriat i magistratura).
2. Penkova A.O. Glavnye tendentsii na rossijskom rynke gruzovyh perevozok v 2019 g. [The main trends in the Russian freight transportation market in 2019] // Molodoj ucheny. 2020. № 7(297). S. 175–178. URL : <https://moluch.ru/archive/297/67454/> (data obrashcheniya: 16.02.2025).
3. Pashkova T.N., Filippova N.A., Pozdnyak A.N. Mezhdunarodnaya perevozka krupnotonnazhnyh грузов na primere perevozki komponentov vetroenergeticheskoy ustanovki [International transportation of large-tonnage cargoes on the example of transportation of components of a wind power plant] // Mir transporta. 2021. Т. 19, № 1. S. 156–173. doi:<https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-1-156-173>
4. Troitskaya N.A., Shilimov M.V. Organizatsiya perevozok spetsificheskikh vidov грузов [Organization of transportation of specific types of goods] : учебное пособие. 2-е изд., испр. Москва : KNORUS, 2016. 240 s. (Bakalavriat).
5. Rosstat. Informatsiya o social'no-ekonomicheskom polozhenii Rossii [Rosstat. Information about the socio-economic situation of Russia] : statisticheskij byulleten'. 2024. URL : <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/osn-12-2024.pdf> (data obrashcheniya: 20.02.2025).
6. Imametdinov R.H. Organizatsiya mezhdunarodnyh perevozok krupnogabaritnyh i tyazhelovesnyh грузов po teritorii Rossijskoj Federatsii [Organization of international transportation of bulky and heavy goods across the territory of the Russian Federation] : avtoreferat diss. ... kandidata ekonomicheskikh nauk : 08.00.05 / R. H. Imametdinov ; Gosudarstvenny universitet upravleniya. Moskva, 2003. 24 s.
7. Pravila dorozhnogo dvizheniya Rossijskoj Federatsii. Raz. 23.5. Spetsial'nye pravila [The rules of the road of the Russian Federation. Section 23.5. Special Rules] : utv. postanovleniem Pravitel'stva RF ot 23.10.1993 g. № 1090.

8. Saprykin S.S., Pak V.V., Degtyarev D.A. Metody diagnostiki sostoyaniya dorozhnogo polotna [Methods of diagnosing the condition of the roadway] // Molodoye uchenye. 2022. № 15(410). S. 52–56. URL: <https://moluch.ru/archive/410/90352/> (data obrashcheniya: 20.02.2025).
9. Borovikov A.G., Kartopoltsev V.M. Otsenka gruzopod'yomnosti stalezhelezobetonnykh prolyotnykh stroeniy avtodorozhnykh mostov [Assessment of the load capacity of steel-reinforced concrete superstructures of highway bridges] // Vestnik TSASU. 2013. № 4(41). URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-gruzopodemnosti-stalezhelezobetonnykh-proletnykh-stroeniy-avtodorozhnykh-mostov> (data obrashcheniya: 24.02.2025).
10. Ob utverzhdenii pravil po ohrane truda pri ekspluatatsii elektroustanovok [On approval of the Rules on labor protection during the operation of electrical installations] : prikaz Mintruda Rossii ot 24.07.2013 g. № 328n (red. ot 15.11.2018) // Rossiyskaya Gazeta. 2013. № 285. URL : <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=282614> (data obrashcheniya: 25.02.2025).
11. Pravila ustrojstva elektroustanovok (PUE). [Rules for the installation of electrical installations]. Gl. 2.4. Vozdushnye linii elektroperedachi napryazheniem do 1 kV : utv. prikazom Minenergo RF ot 20.05.2003 g. № 187. URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200031977> (data obrashcheniya: 18.02.2025).
12. SP 34.13330.2012. Avtomobil'nye dorogi. Aktualizirovannaya versiya SnIP 2.05.02-85 [SP 34.13330.2012. Motor roads. Updated version of SNiP 2.05.02-85] : utv. Prikazom Minregiona RF. ot 30.06.2012 g. № 266. Vved. 01.01.2001. URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200095524> (data obrashcheniya: 25.02.2025).
13. SNiP 2.05.02-85. Avtomobil'nye dorogi [SNiP 2.05.02-85. Motor roads] : utv. Postanovleniem Gosstroya SSSR ot 17.12.1985 g. № 233. Vved. 01.07.1986. URL : <https://docs.cntd.ru/document/5200258> (data obrashcheniya: 25.02.2025).
14. Grebenyuk E.A., Rotkov S.I. Mobil'noe lazernoe skanirovanie gorodskih dorog: otsenka trudozatrata dlya polucheniya kachestvennogo resul'tata [Mobile laser scanning of urban roads: an assessment of labor costs for obtaining high-quality results] // Graphicon : trudy mezhdunarodnoy konferentsii po komp'uternoy grafike i zreniyu. 19–21 sentyabrya. Moskva, 2023. S. 703–709.
15. Bryn M.Ya., Bashirova D.R. Sravnitel'naya otsenka mobil'nogo lazernogo skanirovaniya i aerofotosyomki s bespilotnykh letatel'nykh apparatov pri syomke avtomobil'nykh dorog [Comparative assessment of the effectiveness of mobile laser scanning and aerial photography from unmanned aerial vehicles when photographing motor roads] // Vestnik SSUGiT. 2021. T 26, № 3. S. 20–27. doi:<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-3-20-27>
16. Tehnologii BIM, ontologii i upravleniya aktivami na avtomobil'nykh dorogah Yevropy [Technologies of BIM, ontologies and asset management on European motor roads] / O.N. Pokusaev [et al.] // International journal of open information technologies. 2020. Vol. 8, № 6. S. 108–134.
17. Transport Rossii : informatsionno-statisticheskij byulleten' [Transport of Russia : information and statistical bulletin] / Ministerstvo Transporta Rossijskoj Federatsii. 2022. URL: https://mintrans.gov.ru/storage/app/media/files/3_bulleten_transport_russia.pdf (data obrashcheniya: 21.02.2025).
18. Transport Rossii : informatsionno-statisticheskij byulleten' [Transport of Russia: information and Statistical bulletin] / Ministerstvo Transporta Rossijskoj Federatsii. 2023. URL : URL : <https://mintrans.gov.ru/documents/7/13259> (data obrashcheniya: 21.02.2025).
19. Transport Rossii : informatsionno-statisticheskij byulleten' [Transport of Russia : information and statistical bulletin]. Yanvar'-Dekabr' 2021 g. / Ministerstvo Transporta Rossijskoj Federatsii. URL: <https://mintrans.gov.ru/file/476806> (data obrashcheniya: 19.02.2025).
20. O tekushchej situatsii v Rossijskoj ekonomike. Itogi 2024 [About the current situation in the Russian economy. Results of 2024] / Ministerstvo ekonomicheskogo razvitiya Rossijskoj Federatsii. 2024. URL : https://www.economy.gov.ru/material/file/195754c7897bff1c50dc164890f91407/o_tekushchey_situacii_v_rossiyskoj_ekonomike_itogi_2024_goda.pdf (data obrashcheniya: 19.02.2025).
21. GOST 12.1.051–90. Sistema standartov bezopasnosti truda. Elektrobezopasnost'. Rasstoyaniya bezopasnosti do tokovedushchih chastej, nahodyashchih'sya pod napryazheniem [GOST 12.1.051–90. A system of occupational safety standards. Electrical safety. Safety distances to live parts under voltage] : utv. Postanovleniem Gosstandarta SSSR ot 29.12.1990 g. № 3568 : Vved. 01.01.1992. Moskva : Izd-vo standartov, 1991. 12 s.
22. Problema ekvivalentnosti normativnykh dokumentov po ogranicheniyu dvizheniya gruzovykh avtotransportnykh sredstv i trebovanij k nesushej sposobnosti avtomobil'nykh dorog [The problem of equivalence of regulatory documents on the restriction of the movement of freight vehicles and requirements for the bearing capacity of motor roads] / I.N. Pugachev, Yu.I. Kulikov, S.A. Kazarbina, A.V. Vasiliev // Mir dorog. 2015. № 86. S. 14–16.
23. Pugachev I.N., Kulikov Yu.I., Kazarbin A.V. Problemy terminologii v normativnykh dokumentah avtomobil'no-dorozhnoj ot-rasli [Problems of terminology in regulatory documents of the automobile and road industry] // Mir izmerenij. 2009. № 10(104). S. 47–50.
24. Pugachev I.N., Kulikov Yu.I. Neobkhodim yediny standart po normativnoj nagruzke dlya avtotransportnykh sredstv [A single standard for regulatory load for motor vehicles is needed] // Transportnoe stroitel'stvo. 2010. № 4. S. 20–22.

Информация об авторе

А.Т. Яковлева – студент кафедры «Эксплуатация водного транспорта и промышленное рыболовство».

Information about the author

A.T. Yakovleva – Student, Department of Operation of Water Transport and Industrial Fishing.

Статья поступила в редакцию 27.03.2025; одобрена после рецензирования 02.04.2025; принята к публикации 02.04.2025.
The article was submitted: 27.03.2025; approved after reviewing: 02.04.2025; accepted for publication: 02.04.2025.

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; подрисочная 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