

# ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

MODERN  
TRANSPORTATION  
SYSTEMS AND  
TECHNOLOGIES  
peer-review journal

[transsyst.ru](http://transsyst.ru)

# ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Том 10 | № 2 | 2024

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

## УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

## «ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ»

Электронный рецензируемый научный журнал  
Выходит ежеквартально – 4 раза в год  
Основан в 2013 году

## ИНДЕКСАЦИЯ

- РИНЦ (Российский индекс научного цитирования)
- ВАК (Высшая аттестационная комиссия)
- Google Scholar
- WorldCat
- Crossref
- CyberLeninka

## КОНТАКТЫ

Адрес: 190131, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 9  
E-mail: [trassysyst@mail.ru](mailto:trassysyst@mail.ru)  
WEB: [www.trassysyst.ru](http://www.trassysyst.ru)  
Телефон: +7 (911) 2384445

Научный редактор В.В. Никитин, доктор технических наук, профессор  
Редактор сайта М.Д. Боярский  
Ответственный редактор О.Ю. Смирнова  
Верстка Д.А. Полуниин

## СВИДЕТЕЛЬСТВО о регистрации средства массовой информации

Эл № ФС77-81789 от 31.08.2021 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

## ОПИСАНИЕ ЖУРНАЛА

Сетевой электронный журнал «Инновационные транспортные системы и технологии» публикует статьи фундаментального характера и прикладного направления, а также обзорные статьи, относящиеся ко всем видам транспортной технологии

## ПУБЛИКАЦИЯ В ЖУРНАЛЕ

Журнал отбирает материал для публикации из числа присланных для рассмотрения рукописей. В ходе отбора проводится независимое двойное слепое рецензирование членами редакционной коллегии и внешними экспертами.

Для публикации рукопись, а также все сопроводительные и дополнительные файлы следует направить в редакцию через личный кабинет на сайте журнала по URL: <http://trassysyst.ru/>  
Рукопись и дополнительные материалы следует оформить в соответствии с правилами редакции, см. подробно по <https://trassysyst.ru/trassysyst/about/submissions>

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Титова Тамила Семёновна

д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Первый проректор – Проректор по науке ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

## ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Смирнов Сергей Александрович

Руководитель Научно-образовательного центра инновационного развития пассажирских железнодорожных перевозок имени А.А. Зайцева ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

## НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР

Никитин Виктор Валерьевич

д.т.н., профессор, профессор кафедры «Электротехника и теплоэнергетика», профессор кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

## МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Богданов Александр Владимирович**, д.физ.-мат.н., профессор СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия;  
**Валинский Олег Сергеевич**, к.т.н., ректор ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;  
**Верескун Владимир Дмитриевич**, д.т.н., профессор, ректор РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия;  
**Воробьев Александр Алфеевич**, д.т.н., доцент, Заведующий кафедрой «Наземные транспортно-технологические комплексы», Профессор кафедры «Электрическая тяга», и.о. заведующего кафедрой «Методы и приборы неразрушающего контроля» ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;  
**Журавлева Наталья Александровна**, доктор экономических наук, профессор Заведующий кафедрой «Экономика транспорта», Директор Института прикладной экономики и бухгалтерского учета железнодорожного транспорта ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;  
**Клюшпис Йоханнес**, доктор наук 2-й степени, полный профессор Деггендорфской высшей технической школы, Мюнхен, Германия;  
**Колесников Владимир Иванович**, академик РАН, д.т.н., профессор, президент РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия;  
**Кручинина Ирина Юрьевна**, д.т.н., директор ИХС РАН, Санкт-Петербург, Россия;  
**Ли Вэйли**, PhD, профессор Пекинского транспортного университета, Пекин, КНР;  
**Линь Гобинь**, PhD, профессор, директор Национального транспортно-инженерного центра Маглев, доцент Университета Тунцзи, Шанхай, КНР;  
**Ледяев Александр Петрович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Тоннели и метрополитены», ведущий научный сотрудник Научно-аналитической группы по развитию городского транспорта ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;  
**Ма Чжисюнь**, PhD, старший научный сотрудник Национального транспортно-инженерного центра Маглев, доцент Университета Тунцзи, Шанхай, КНР;  
**Мулюков Радик Рафикович**, член-кор. РАН, д.физ.-мат.н., директор Института проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия;  
**Ни Фэй**, PhD, младший научный сотрудник, Национальный транспортно-инженерный центр Маглев, Университет Тунцзи, Шанхай, КНР;  
**Никитенко Владимир Александрович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Физика» РУТ (МИИТ), Москва, Россия;  
**Подсорин Виктор Александрович**, д.э.н., профессор РУТ (МИИТ), Москва, Россия;  
**Повадол Сирирангси**, Дг., Заместитель декана Факультета логистики и управления транспортом Паняпватского института управления, Паккред, Таиланд;  
**Смирнов Владимир Николаевич**, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Мосты» ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;  
**Соломин Владимир Александрович**, д.т.н., профессор РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия;  
**Стэфан Ричард**, д.т.н., полный профессор Факультета электротехники, заведующий Лабораторией электрических машин Федерального университета Рио-де-Жанейро, Рио-де-Жанейро, Бразилия;  
**Талантова Клара Васильевна**, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения» ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;  
**Терешина Наталья Петровна**, д.э.н., профессор, Заведующая кафедрой «Экономика и управление на транспорте» РУТ (МИИТ), Москва, Россия;  
**Хан Хён-Сук**, PhD, начальник Департамента Маглев и линейных двигателей, старший научный сотрудник Корейского института машиностроения и материаловедения, Тэджон, Республика Корея.

## FOUNDER AND PUBLISHER

Emperor Alexander I St. Petersburg State  
Transport University St. Petersburg, Russia

## “MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES”

Electronic peer-reviewed research journal  
Issued 4 times a year (quarterly)  
Established in 2013

## INDEXING

- eLibrary (Russian Science Citation Index)
- Higher Attestation Commission of Russia's  
Ministry of Education and Science (VAK)
- Google Scholar
- WorldCat
- Crossref
- CyberLeninka

## CONTACTS

**Address:** 190031, St. Petersburg,  
115 Moskovskiy Ave., room 9/11-5  
**E-mail:** [transysst@mail.ru](mailto:transysst@mail.ru)  
**WEB:** [www.transysst.ru](http://www.transysst.ru)  
**Телефон:** +7 (911) 2384445

Science Editor V.V. Nikitin,  
Doctor of Technical Science, Professor  
WEB- Editor M.D. Boyarsky  
The Executive Editor O.Yu. Smirnova  
Layout Editor D.A. Polunin

## AIMS & SCOPE

Network electronic journal “Modern  
Transportation Systems and Technologies”  
publishes articles of a fundamental nature  
and application areas, as well as review articles  
pertaining to all types of transport technology

## JOURNAL CONTENT SELECTION

The journal selects material based  
on the double-blind peer-review conducted  
by members of the editorial board  
and external experts.  
To be published, the manuscript  
and all accompanying files should be sent  
to the editorial team through a personal account  
on the journal's website at: <http://trassysst.ru/>  
The manuscript and additional materials should  
be prepared and arranged in accordance  
with the author guidelines (see in detail at:  
<https://trassysst.ru/trassysst/about/submissions>)

ISSN 2782-3733 (Online)

# MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

Vol. 10 | Issue 2 | 2024

PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL

## EDITOR-IN-CHIEF

**Tamila S. Titova**

Dr. Sc., Professor, First Vice-Rector – Vice-Rector for Scientific Work PGUPS,  
Honored Worker of Science of the Russian Federation, St. Petersburg, Russia

## Deputy EDITOR-IN-CHIEF

**Sergey A. Smirnov**

Director A.A. Zaitsev Scientific-Educational center of passenger railway  
transportation innovative development PGUPS, St. Petersburg, Russia

## THE SCIENTIFIC EDITOR

**Viktor V. Nikitin**

Dr.Sc., Professor, Professor Departments Electric Power Traction and Theoretical Bases  
of Electrical Engineering PGUPS, St. Petersburg, Russia

## INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

- Aleksandr V. Bogdanov**, Dr. Physics and Mathematics, Professor, St. Petersburg State University,  
St. Petersburg, Russia;
- Oleg S. Valinsky**, Ph.D., rector PGUPS, St. Petersburg, Russia;
- Vladimir D. Vereskun**, Dr. Sc., Professor, Rector of Rostov State Transport University,  
Rostov-on-Don, Russia;
- Aleksandr A. Vorobyev**, Dr. Sc., Associate professor, Head of Department Mechanical Handling and Road  
Building Machines, Professor Electric Power Traction PGUPS, St. Petersburg, Russia;
- Natal'ya A. Zhuravleva**, Dr. Economics, Professor Head of the Department of Economics of Transport,  
Director of the Institute of Applied Economics and Accounting of Railway Transport PGUPS, St. Petersburg,  
Russia;
- Johannes O. Kluehspies**, 2nd Dr.'s Degree, Full Professor at Deggendorf Institute of Technology,  
Munich, Germany;
- Vladimir Kolesnikov**, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor, the President  
Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;
- Irina Kruchinina**, Dr.Sc., Director of Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg, Russia;
- Weili Li**, Ph.D., Professor, Beijing Jiaotong University, Beijing, China;
- Guobin Lin**, PhD, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center (NMTC), Director,  
Professor, Tongji University, Shanghai, China ;
- Aleksandr P. Ledyaev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Tunnels  
and Subways, Leading Research Fellow Scientific and Analytical Group for the Development of Urban  
Transport PGUPS, St. Petersburg, Russia;
- Zhixun Ma**, PhD, Associate Professor, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D  
Center (NMTC), Tongji University, Shanghai, China;
- Radik R. Mulyukov**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Physics  
and Mathematics, Director of Superplasticity Metals Institute for Metals Superplasticity Problems at RAS,  
Ufa, Russia;
- Fei Ni**, PhD, Assistant Researcher, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center,  
Tongji University, Shanghai, China;
- Vladimir A. Nikitenko**, Dr. Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Physics  
Russian University of Transport, Moscow, Russia;
- Viktor A. Podgorin**, Doctor of Economics Science, Professor Russian Transport University, Moscow, Russia;
- Sirirangsi Poovadol**, Dr.Sc., MBA, Deputy Dean Faculty of Logistics and Transportation Management  
Panyapiwat Institute of Management, Pakkred, Thailand;
- Vladimir N. Smirnov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department Bridges PGUPS,  
St. Petersburg, Russia;
- Vladimir A. Solomin**, Dr. Sc., Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;
- Richard M. Stephan**, Dr.Sc., Full Professor, Department of Electrical Engineering, Head of Electric Machines  
Laboratory, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil;
- Klara V. Talantova**, Dr. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Building Structures  
**Natalya Tereshina**, Dr. Economics, Professor, Head of the Department of Economics and Transport  
Management Russian University of Transport, Moscow, Russia;
- Han Hyung-Suk**, PhD, Head of the Department of Maglev and Linear Drives, Principle Researcher,  
Korea Institute of Machinery & Material (KIMM), Daejeon, the Republic of Korea.

16+

# СОДЕРЖАНИЕ

---

## ОБЗОРЫ

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

**Ахтямов Р.Г.**

Анализ подходов к транспортировке уловленного углекислого газа к местам хранения.....159

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

**Лисов А.А., Панишев С.А.**

RFID идентификация как дополнение системы беспроводной зарядки

электротранспортных средств .....171

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

**Лунина А.В., Кучерявая Е.В., Аверченко Г.Л.**

Мосты с балками комбинированного сечения из клееной древесины и железобетона .....188

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

**Федосеев Н.А., Алексеев С.В., Шевченко С.М.**

Обзор теоретических предпосылок к уплотнению грунта .....200

## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

**Александров Д.А., Мартиросян И.В., Покровский С.В., Залеткина В.В., Руднев И.А.**

Энергоемкость и энергетические потери индуктивного накопителя энергии на основе композитных ВТСП лент.....215

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

**Саушев А.В., Белоусов И.В., Бова Е.В., Румянцев А.Ю.**

Неполнофазные алгоритмы широтно-импульсной модуляции трехфазных напряжений в системах частотного управления электроприводами.....231

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Строительные конструкции и транспортные системы

**Сенькин Н.А., Закарлюкина В.М., Давидюк Э.В., Ли П.А., Большихшапок И.С**

Конструктивно-технологические предложения по созданию высокоскоростной транспортно-энергетической магистрали в Арктике .....247

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

**Демьянович И.В.**

Повышение эффективности работы путевых машинных станций.....274

# CONTENTS

---

## REVIEWS

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Ground transport and logistics facilities and complexes

**Akhtyamov R.G.**

Analysis of approaches to captured carbon dioxide transporting to storage places.....159

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

**Lisov A.A., Panishev S.A.**

RFID as an addition of wireless charging systems for electric vehicles .....171

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

**Lunina A.V., Kucheryavaya E.V., Averchenko G.A.**

Bridges with beams of combined cross section made of glued wood and reinforced concrete.....188

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

**Fedoseev N.A., Alekseev S.V., Shevchenko S.M.**

A review of the theoretical preconditions for soil compaction .....200

## ORIGINAL STUDIES

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

**Alexandrov D.A., Martirosian I.V., Pokrovskii S.V., Zaletkina V.V., Rudnev I.A.**

Energy capacity and energy losses of inductive energy storage device based on composite HTS tapes .....215

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

**Saushev A.V., Belousov I.V., Bova E.V., Rumyantsev A.Yu.**

Incomplete-phase algorithms of pulse-width modulation of three-phase voltages  
in frequency control systems of electric drives.....231

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Construction structures and transportation system

**Senkin N.A., Zakarlyukina V.M., Davidyuk E.V., Li P.A., Bolshikhshapok I.S.**

Constructive and technological proposals for the creation of a high-speed transport  
and energy highway in the Arctic.....247

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Transport and transport-technological systems of the country,  
its regions and cities, organization of production in transport

Section 3. TRANSPORT ECONOMICS

**Demyanovich I.V.**

Improving the efficiency of track machine stations in BAM conditions .....274

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

<https://doi.org/10.17816/transsyst626647>

© Р.Г. Ахтямов

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I  
(Санкт-Петербург, Россия)

## АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ТРАНСПОРТИРОВКЕ УЛОВЛЕННОГО УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА К МЕСТАМ ХРАНЕНИЯ

**Цель.** Анализ существующих и перспективных подходов к транспортировке уловленного углекислого газа к местам хранения.

**Объект и методы.** Объектом исследования является система транспортировки уловленного углекислого газа к местам хранения. В качестве методов транспортировки выделены трубопроводная, водная, железнодорожная и автомобильная системы перевозки углекислого газа к местам захоронения.

**Результаты.** Выявлены особенности транспортировки уловленного углекислого газа в различных фазовых состояниях. Определены характеристики качества CO<sub>2</sub> влияющие на долговечность материалов из которых изготовлены транспортные емкости и системы. Проанализированы характеристики существующих трубопроводов для транспортировки углекислого газа. Показано, что при проектировании углеродопроводов целесообразно исходить из физических, экологических и социальных факторов района расположения трубопровода.

**Заключение.** Проведенный анализ способов транспортировки уловленного углекислого газа к местам его захоронения показал, что в настоящий момент существует система транспортировки выбросов трубопроводным и водным транспортом. При этом, перевозка CO<sub>2</sub> водным транспортом имеет ряд сходств с транспортировкой сжиженного нефтяного газа. Транспортировка уловленного углекислого газа железнодорожным или автомобильным транспортом является более дорогостоящей, по сравнению с трубопроводным и водным транспортом и может быть целесообразна для небольших точечных территориально распределенных источников эмиссии, на которых возможно временное накопление выбросов в емкостях.

**Ключевые слова:** изменение климата; парниковые газы; углекислый газ; улавливание и хранение углекислого газа; транспортировка углекислого газа; трубопроводный транспорт; водный транспорт; железнодорожный транспорт; автомобильный транспорт

### Как цитировать:

Ахтямов Р.Г. Анализ подходов к транспортировке уловленного углекислого газа к местам хранения // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 159–170. doi: 10.17816/transsyst626647

---

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Ground transport and logistics facilities and complexes

© **R.G. Akhtyamov**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
(St. Petersburg, Russia)

## ANALYSIS OF APPROACHES TO CAPTURED CARBON DIOXIDE TRANSPORTING TO STORAGE PLACES

**Aim.** This study focuses on analyzing various approaches to transporting captured carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) to storage sites.

**Methods.** The study examines four transportation methods for moving CO<sub>2</sub> to storage sites: pipeline, water, rail, and road systems.

**Results.** Our analysis revealed the unique characteristics of transporting captured CO<sub>2</sub> in various phase states. We determined the quality characteristics of CO<sub>2</sub> affecting the durability of the materials used in transportation containers and systems. Additionally, we analyzed the features of existing pipelines specifically designed for CO<sub>2</sub> transportation. that the findings suggest that when designing carbon pipelines, it is essential to consider the physical, environmental, and social factors of the area where the pipeline will be located.

**Conclusion.** The analysis of methods for transporting captured CO<sub>2</sub> to storage sites indicates that pipeline and water transport systems are currently the most viable options. Transporting CO<sub>2</sub> by water shares several similarities with the transportation of liquefied petroleum gas. Conversely, rail and road CO<sub>2</sub> transportation tend to be more expensive compared to pipeline and water options and may be appropriate for smaller, geographically distributed emission point sources where temporary storage in containers is feasible.

**Keywords:** climate change; green gases; carbon dioxide; carbon capture and storage; carbon dioxide transportation; pipeline transport; water transport; railway transport; automobile transport.

### To cite this article:

Akhtyamov RG. Analysis of approaches to captured carbon dioxide transporting to storage places. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(2):159–170. doi: 10.17816/transsyst626647

## ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата, обусловленное выбросами парниковых газов, становится все более острой проблемой. Концентрация углекислого газа в атмосфере Земли в 2016 г. преодолела отметку в 400 ppm (parts per million – частицы CO<sub>2</sub> на миллион частиц воздуха). Ожидается, что к концу столетия концентрация CO<sub>2</sub> может увеличиться примерно в 2 раза [1]. При этом, несмотря на устойчивый рост солнечной и ветровой энергетики, конкурентоспособной альтернативы традиционным технологиям сжигания углеводородов до сих пор не существует.

По данным Международного энергетического агентства, наибольшая доля выбросов углекислого газа приходится на предприятия черной металлургии (30%) и цементной промышленности (26%). Спрос на продукцию этих отраслей вырастет к 2050 г. на 30% и 22% соответственно [1].

Технологии улавливания и хранения углекислого газа (carbon capture and storage technology – CCS) признаны критически важными для сдерживания роста температуры на планете в пределах 1,5–2 °С к 2050 г [2]. Применение данных технологий – это эффективный способ существенно снизить объем выбросов парниковых газов промышленностью и транспортом. Потенциал применения CCS очень широк, текущие глобальные мощности активных проектов CCS по подземному хранению составляют около 50 млн т/год.

По оценкам Global CCUS Institute [3] мощности по хранению CO<sub>2</sub> в геологических формациях увеличиваются на 61,8 МтCO<sub>2</sub>/год. Суммарная мощность проектов CCS будет нарастать до 170 МтCO<sub>2</sub>/год к 2030 г. и до 5 ГтCO<sub>2</sub>/год к 2050 г., в то время как суммарные антропогенные выбросы парниковых газов снизятся до 10 ГтCO<sub>2</sub>/год.

Таким образом, к 2050 г. относительный вклад проектов CCS в снижение выбросов увеличится и будет покрывать до половины выбросов, в то время как сейчас мощность проектов CCS составляет менее 1% от суммарного объема выбросов [2].

Несмотря на то, что CCS является одной и наиболее перспективных технологий, которая может способствовать выполнению целей Парижского соглашения [4], количество действующих проектов в данной области невелико. Текущая ситуация с развитием сектора хранения CO<sub>2</sub> не соответствует стратегическим ориентирам [5], определяющим необходимость создания новой индустрии в мировом масштабе по транспортировке и хранению углекислого газа. Наиболее остро

проблема создания масштабной инфраструктуры хранения  $\text{CO}_2$ , в рамках региональных и национальных программ декарбонизации экономики, стоит перед промышленно развитыми странами, на которые приходится существенная часть мировой эмиссии углекислого газа [6].

Технологическая цепочка CCS состоит из следующих основных стадий: выявление источника  $\text{CO}_2$ ; выделение (улавливание)  $\text{CO}_2$  из смеси дымовых газов; очистка и сжатие  $\text{CO}_2$  (далее возможно полезное использование путем конверсии в полезные продукты); транспортировка к местам хранения; размещение в геологических пластах для долгосрочного хранения.

Целью данной работы является анализ существующих и перспективных подходов к транспортировке уловленного углекислого газа к местам хранения.

## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Транспортировка к местам хранения – это стадия улавливания и хранения  $\text{CO}_2$ , которая связывает источники выбросов и хранилища углекислого газа. Начало и конец стадии транспортировки к местам хранения может определяться национальными или локальными нормативно-правовыми актами. Стадия транспортировки  $\text{CO}_2$  регулируется нормативными актами в области транспортной и общественной безопасности, аналогично иным видам транспорта. При этом транспортировка больших количеств газообразных веществ, в частности углекислого газа трубопроводным транспортом, является частью текущей практики [2].

Транспортировка углекислого газа трубопроводным транспортом к местам хранения реализована на практике, и подобные трубопроводы имеют протяженность более 2500 км на западе США и транспортируют около 50 Мт $\text{CO}_2$ /год для повышения нефтеотдачи пластов в ряде проектов. Требования к транспортируемому углекислому газу заключаются в его максимальной инертности по отношению к материалу изготовления трубопровода для транспортировки углекислого газа – углеродопровода.

Существуют следующие характеристики качества  $\text{CO}_2$ , которых должен придерживаться поставщик газа перед его поступлением в углеродопровод (на примере проекта «Canyon Reef Carriers») [2]:

- содержание углекислого газа: продукт должен содержать не менее 95% диоксида углерода;

- содержание воды: продукт не должен содержать воды в жидком состоянии и не должен содержать более  $0,48 \text{ г/м}^3$  воды в паровой фазе;
- содержание сероводорода: продукт не должен содержать более 1500 ppm по весу сероводорода;
- содержание общей серы: продукт не должен содержать более 1450 ppm по весу общей серы;
- температура продукта не должна превышать  $48,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- содержание азота: продукт не должен содержать более 4% азота;
- содержание углеводородов: продукт не должен содержать более 5% углеводородов, а точка росы в отношении углеводородов не должна превышать  $-28,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- содержание кислорода: продукт не должен содержать более 10 ppm по весу кислорода;
- содержание гликоля: продукт не должен содержать более  $4 \cdot 10^{-5} \text{ л/м}^3$  гликоля, и такой гликоль не должен присутствовать в жидком состоянии при термобарическом режиме трубопровода.

Скорость коррозии трубопровода при транспортировке сухого углекислого газа (относительная влажность менее 60%) составляет около  $0,01 \text{ мм/год}$  при давлении 9–12 МПа. Наличие 800–1000 ppm  $\text{H}_2\text{S}$  при давлении 14 МПа обуславливает скорость коррозии углеродистой стали около  $0,0005 \text{ мм/год}$ . Исследования [7] показывают, что при транспортировке сухого  $\text{CO}_2$ , при высоком давлении в трубопроводах из углеродистой стали, скорость коррозии за 12 лет составляет  $0,00025\text{--}0,0025 \text{ мм/год}$ . Скорость коррозии намного выше (до  $0,7 \text{ мм/год}$ ), если в трубопроводе присутствует вода в жидком состоянии. Однако, при проектировании, строительстве и введении в эксплуатацию углеродопроводов из коррозионностойких материалов возможна безопасная транспортировка газа содержащего воду, сероводород и другие загрязняющие вещества, однако это значительно увеличивает стоимость трубопроводов.

При прокладывании углеродопровода через населенные пункты дополнительно должны реализовываться конструктивные факторы по защите от возникновения избыточного давления в трубопроводе и обнаружению утечек транспортируемой среды. Внедрение комплекса данных конструктивных факторов может быть основано на использовании существующих мер по обеспечению безопасности нефтепроводов и газопроводов в аналогичных условиях размещения.

Транспортировка углекислого газа водным транспортом также реализуется на практике, ввиду того что технология транспортировки сжиженного и сжатого природного газа отработана при перевозке морскими танкерами. Углекислый газ транспортируется таким же образом, но в меньших масштабах из-за ограниченного спроса на него. Свойства сжиженного углекислого газа схожи со свойствами сжиженных углеводородных газов, и данная технология может быть адаптирована для перевозки значительных объемов углекислого газа.

Сжиженный или сжатый углекислый газ также можно перевозить железнодорожными и автомобильными цистернами. При этом, затраты на данные виды перевозок являются значительными в настоящее время, и имеют актуальность для небольших точечных источников эмиссии углекислого газа при условии изменения нормативного регулирования выбросов и платы за выбросы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Транспортировка  $\text{CO}_2$  возможна в трех состояниях: газообразном, жидком и твердом. Цистерны, трубопроводы и суда могут быть использованы для газообразного и жидкого углекислого газа. Газ, транспортируемый при давлении близком к атмосферному, занимает значительный объем, что обуславливает необходимость в значительных объемах транспортных емкостей. Объем транспортируемого  $\text{CO}_2$  может быть значительно сокращен путем сжатия, сжижения, перевода в твердую фазу или гидратации. При этом сжижение является отработанной технологией морской транспортировки сжиженного нефтяного или природного газа. Существующие технологии и опыт могут быть перенесены на транспорт сжиженного  $\text{CO}_2$ .

Перевод  $\text{CO}_2$  в твердую фазу требует затрат существенно большего количества энергии по сравнению с другими вариантами сокращения объема, а также является более дорогостоящим. Исследования и разработки по транспортировке гидратов природного газа для замены систем сжижения природного газа, находятся в стадии разработки, и результаты могут быть применены к перевозкам  $\text{CO}_2$  в будущем. При использовании трубопроводного транспорта объем транспортируемого вещества значительно сокращается за счет транспортировки при высоком давлении в газопроводах при рабочем давлении от 10 до 80 МПа.

Транспортная инфраструктура для перевозки углекислого газа в необходимых для смягчения последствий изменения климата

количествах [2] включает развитую сеть углеводопроводов. Характеристики существующих трубопроводов для транспортировки углекислого газа приведены в таблице.

**Таблица.** Характеристики существующих трубопроводов для транспортировки углекислого газа

**Table.** Characteristics of existing pipelines for transporting carbon dioxide

Трубопровод	Местонахождение трубопровода	Оператор	Мощность, МтСО <sub>2</sub> /год	Длина, км	Год создания
Cortez	США	Kinder Morgan	19,3	808	1984
Sheep Mountain	США	BP Amoco	9,5	660	1984
Bravo	США	BP Amoco	7,3	350	1984
Canyon Reef Carriers	США	Kinder Morgan	5,2	225	1972
Val Verde	США	Petrosource	2,5	130	1998
Bati Raman	Турция	Turkish Petroleum	1,1	90	1983
Weyburn	США и Канада	North Dakota Gasification	5	328	2000
Всего			49,9	2591	

Анализ существующих углеводопроводов показывает, что их создание зачастую связано с реализацией технологии повышения нефтеотдачи пласта. При этом содержание азота является значимым для данного вида использования СО<sub>2</sub>, нежели чем для транспортировки СО<sub>2</sub> с целью захоронения в геологических пластах. При строительстве углеводопровод должен заглубляться не менее чем на 1 м в пределах полосы отвода. При прохождении в непосредственной близости от населенных пунктов расположение трубопровода должно быть обозначено для осведомления жителей. Вместе с тем, жители также должны быть оповещены о признаках и порядке действий при утечке СО<sub>2</sub>.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При проектировании углеводопроводов целесообразно исходить из физических, экологических и социальных факторов района расположения трубопровода [8, 9]. Также необходимо определение

предполагаемого маршрута и особенностей углеродопровода для оценки рассматриваемого проекта строительства и его стоимости. В качестве особенностей углеродопровода можно выделить такие характеристики транспортного процесса, как физические характеристики транспортируемой смеси, оптимальные размеры и давление в трубопроводе, а также особенности механической конструкций (клапаны, насосы, компрессоры, уплотнения, и т.д.). Топография полосы отвода трубопровода оказывает значительное влияние на проектирование углеродопроводов, при этом должны учитываться особенности местности, такие как наличие гористой или пустынной местности, необходимость пересечения водных объектов.

При оценке экологических особенностей местности целесообразно учитывать годовой диапазон температуры во время строительства и в период эксплуатации, наличие потенциально неустойчивых склонов, морозного пучения, многолетнемерзлых грунтов, сейсмической активности, водоносных горизонтов и другие экологических особенностей, в том числе близость особо охраняемых природных территорий.

Следует также учитывать наличие существующей потребности в создании новой инфраструктуры, такой как автомобильные или железные дороги, трубопроводные эстакады, сельские или городские условия и пр.

Рассматривая возможность транспортировки уловленного углекислого газа водным транспортом, следует учитывать, что улавливание углекислого газа в выбросах промышленных предприятий ведется непрерывно. Однако, при использовании водного транспорта необходимо учитывать дискретность цикла судовых перевозок. Последнее обстоятельство предполагает, что водная транспортная система должна иметь временное хранение  $\text{CO}_2$  на суше. Емкость берегового хранилища  $\text{CO}_2$ , скорость обслуживания, количество судов и график отгрузки могут планироваться с учетом, скорости улавливания  $\text{CO}_2$ , расстояния транспортировки, а также социальных, климатических и технических особенностей. Перевозка  $\text{CO}_2$  на судах имеет ряд сходств с транспортировкой сжиженного нефтяного газа водным транспортом.

Если пункт доставки  $\text{CO}_2$  находится на берегу, то выгрузка с судов производится в резервуары временного хранения или непосредственно в систему захоронения  $\text{CO}_2$  в геологические формации. В случае, если пункт доставки находится на воде, то выгрузка осуществляется в плавучее

хранилище (аналогично производственно-хранилищному комплексу, применяемому при морской добыче нефти), или непосредственно в систему захоронения  $\text{CO}_2$  в геологические формации.

В настоящее время, использование судов для перевозки  $\text{CO}_2$  реализовано в виде транспортировки сжиженного пищевого углекислого газа из крупных точечных источников до прибрежных распределительных терминалов в регионах потребителей. Дальнейшие поставки от распределительных терминалов  $\text{CO}_2$  осуществляются либо автоцистернами, либо в баллонах под давлением. Кроме того, ведется работа по проектированию крупных судов для перевозки  $\text{CO}_2$  и объектов инфраструктуры по сжижению и промежуточному хранению транспортируемого газа.

Перевозка уловленного углекислого газа железнодорожным или автомобильным транспортом является более дорогостоящим способом транспортировки, по сравнению с трубопроводным и водным транспортом. Выбросы точечных крупных источников выбросов целесообразно направлять в сеть углеродопроводов, однако существенная часть выбросов происходит на небольших точечных территориально распределенных объектах электроснабжения, теплоснабжения и иных производственных предприятиях. При наличии резервуаров временного хранения  $\text{CO}_2$  на данных объектах возможно накопление выбросов в емкостях на железнодорожной платформе или колесной базе, для периодического вывоза сжатых газов видом транспорта, подъездные пути к которому обеспечены объектом эмиссии  $\text{CO}_2$ .

Наряду с этим, возможно накопление выбросов  $\text{CO}_2$  в стационарных резервуарах, размещенных на производственных площадках предприятий с последующим периодическим перекачиваем в железнодорожные или автомобильные емкости для транспортировки выбросов к местам захоронения углекислого газа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ способов транспортировки уловленного углекислого газа к местам его захоронения показал, что в настоящий момент существует система транспортировки выбросов трубопроводным транспортом. Протяженность углеродопроводов составляет более 2500 км, и уловленный углекислый газ используется для повышения нефтеотдачи пластов. К тому же, для обеспечения безопасности, в том числе снижения коррозионного износа трубопровода, поставщик газа

должен придерживаться определенных характеристик качества CO<sub>2</sub>, перед его поступлением в углеводород.

Перевозка CO<sub>2</sub> водным транспортом имеет ряд сходств с транспортировкой сжиженного нефтяного газа. В то же время, данный вид перевозок должен быть обеспечен инфраструктурой накопления и временного хранения уловленного CO<sub>2</sub>, что обуславливается дискретным характером водных перевозок, в отличие от трубопроводных.

Транспортировка уловленного углекислого газа железнодорожным или автомобильным транспортом является более дорогостоящим, по сравнению с трубопроводным и водным транспортом и не является целесообразным для точечных крупных источников выбросов. Однако при наличии резервуаров временного хранения CO<sub>2</sub> на небольших точечных территориально распределенных источниках эмиссии возможно накопление выбросов в емкостях на железнодорожной платформе или колесной базе, для периодического вывоза сжатых газов тем видом транспорта, подъездными путями к которым обеспечен объект эмиссии CO<sub>2</sub>.

**Авторы заявляют, что:**

1. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

**The authors state that:**

1. This article does not contain any studies involving human subjects.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глобальные технологические тренды. Трендлеттер / рациональное природопользование. Технологии улавливания и захоронения углерода. Дата обращения: 13.01.2024. Режим доступа: <http://issek.hse.ru/trendletter>
2. Metz B., Davidson O., de Coninck H. C., et al. IPCC, 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
3. Scaling up the CCS Market to Deliver Net-Zero Emissions. Дата обращения: 13.01.2024. Режим доступа: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/scaling-up-the-ccs-market-to-deliver-net-zero-emissions/>
4. Парижское соглашение по климату. Дата обращения: 13.01.2024. Режим доступа: [https://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/russian\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/russian_paris_agreement.pdf)

5. Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M., et al. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2023. doi: 10.1017/9781009325844
6. Технологии по улавливанию, хранению и использованию углерода (CCUS) – технологическая основа декарбонизации тяжелой промышленности в РФ. Дата обращения: 13.01.2024. Режим доступа: [https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure\\_RU\\_final\\_0.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure_RU_final_0.pdf)
7. Seiersten M. Material selection for separation, transportation and disposal of CO<sub>2</sub>. In: *Proceedings Corrosion 2001*, National Association of Corrosion Engineers, 2001;01042 doi: 10.1016/b978-008044570-0/50143-4
8. Ахтямов Р.Г., Мещерякова Н.А. Реализация подходов к сокращению выбросов парниковых газов в железнодорожной отрасли // *Безопасность жизнедеятельности*. 2023. № 2(266). С. 20–25. EDN: JMPRZA
9. Titova T., Akhtyamov R., Nasyrova E., Elizaryev A. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 49. P. 473–478. doi: 10.1007/978-981-15-0450-1\_49

## REFERENCES

1. Global'nye tekhnologicheskie trendy. Trendletter / racional'noe prirodopol'zovanie. Tekhnologii ulavlivaniya i zahoroneniya ugleroda [Internet]. [cited 2024 January 13]. Available from: <http://issek.hse.ru/trendletter> (In Russ.)
2. Metz B, Davidson O, de Coninck HC, et al. IPCC, 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
3. Scaling up the CCS Market to Deliver Net-Zero Emissions [Internet]. [cited 2024 January 13]. Available from: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/scaling-up-the-ccs-market-to-deliver-net-zero-emissions/>
4. Parizhskoe soglasenie po klimatu [Internet]. [cited 2024 January 13]. Available from: [https://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/russian\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/russian_paris_agreement.pdf) (In Russ.)
5. Pörtner H-O, Roberts DC, Tignor M, et al. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2023. doi: 10.1017/9781009325844
6. Tekhnologii po ulavlivaniyu, hraneniyu i ispol'zovaniyu ugleroda (CCUS) – tekhnologicheskaya osnova dekarbonizatsii tyazhelej promyshlennosti v RF [Internet]. [cited 2024 January 13]. Available from: [https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure\\_RU\\_final\\_0.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure_RU_final_0.pdf) (In Russ.)
7. Seiersten M. Material selection for separation, transportation and disposal of CO<sub>2</sub>. In: *Proceedings Corrosion 2001*. National Association of Corrosion Engineers; 2001;01042. doi: 10.1016/b978-008044570-0/50143-4

8. Akhtyamov RG, Mescheriakova NA. Implementation of approaches to reduce greenhouse gas emissions in the railway industry. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2023;2(266):20–25. (In Russ.)
9. Titova T, Akhtyamov R, Nasyrova E, Elizaryev A. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020;49:473–478. doi: 10.1007/978-981-15-0450-1\_49

**Сведения об авторах:**

**Ахтямов Расул Гумерович**, кандидат технических наук, доцент;  
eLibrary SPIN: 2812-3782; ORCID: 0000-0001-8732-219X  
E-mail: ahtamov\_zchs@mail.ru

**Information about the authors:**

**Rasul G. Akhtyamov**, Candidate of Technical Sciences;  
eLibrary SPIN: 2812-3782; ORCID: 0000-0001-8732-219X;  
E-mail: ahtamov\_zchs@mail.ru

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst630045>

© А.А. Лисов, С.А. Панишев

Южно-Уральский государственный университет

(Челябинск, Россия)

## RFID ИДЕНТИФИКАЦИЯ КАК ДОПОЛНЕНИЕ СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**Цель.** Проведение обзора существующих методов беспроводной зарядки электротранспортных средств, а также предложение наиболее оптимального варианта для реализации идентификации транспортного средства с помощью RFID для автоматизированной, безопасной и удобной авторизации и оплаты владельцами электромобилей в процессе зарядки.

**Материалы и методы.** Для определения наиболее оптимального варианта реализации системы беспроводной зарядки был проведен анализ современных исследований в данной области. На основании этого анализа для выбранной системы индуктивной зарядки было предложено расширить стандартный функционал зарядки с помощью контроллера серии «STWBC Qi» для интеграции RFID и других датчиков.

**Результаты.** Существует 4 основных типа систем беспроводной зарядки: индуктивная передача энергии, емкостная передача энергии, зарядка на основе вращающихся постоянных магнитов, способ передачи энергии с использованием микроволнового излучения и радиоволн. Индукционный метод является наиболее эффективным среди указанных выше. Беспроводные зарядные устройства также могут быть оснащены специальной системой RFID-идентификации для автоматизации процесса оплаты.

**Заключение.** Беспроводная зарядка является лучшей альтернативой традиционным проводным системам зарядки в городских условиях, поскольку парковочные места не заняты дополнительной инфраструктурой, необходимой для проводной зарядки. Индуктивные зарядные станции являются наиболее предпочтительным вариантом с точки зрения параметров: цена – производительность – качество. Контроллер серии «STWBC Qi» не только обеспечивает интеграцию RFID-идентификации, а также является ключевым компонентом для управления системой индуктивной беспроводной зарядки.

**Ключевые слова:** беспроводная передача энергии; электромобили; RFID; STM.

### Как цитировать:

Лисов А.А., Панишев С.А. RFID идентификация как дополнение системы беспроводной зарядки электротранспортных средств // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 171–187. doi: 10.17816/transsyst630045

## Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© A.A. Lisov, S.A. Panishev

South Ural State University

(Chelyabinsk, Russia)

**RFID IDENTIFICATION AS AN ADDITION  
WIRELESS CHARGING SYSTEMS FOR ELECTRIC VEHICLES**

**Aim:** The aim of this study is to review existing methods for wireless charging of electric vehicles and propose the most optimal option for implementing vehicle identification using RFID. This will ensure automated, secure, and convenient authorization and payment of electric vehicle owners during the charging process.

**Materials and Methods.** To determine the most optimal wireless charging system, we conducted an analysis of modern research in this field. Based on this analysis, we selected inductive charging as the preferred method and proposed enhancing its standard functionality by integrating RFID and other sensors using the STWBC Qi series controller.

**Results.** There are four main types of wireless charging systems: inductive energy transfer, capacitive energy transfer, rotating permanent magnet charging, and microwave and radio wave energy transfer methods. Among these, the induction method is the most effective. Additionally, wireless chargers can be equipped with a special RFID system to automate the payment process.

**Conclusion.** Wireless charging offers a superior alternative to traditional wired charging systems in urban environments as it eliminates the need for additional infrastructure that occupies parking spaces. Inductive charging stations are the most preferable option when considering parameters such as price, performance, and quality. The “STWBC Qi” series controller not only facilitates RFID integration but also serves as a key component for controlling the inductive wireless charging system.

**Keywords:** wireless power transfer; electric vehicles; RFID; STM.

**To cite this article:**

Lisov AA, Panishev SA. RFID as an addition of wireless charging systems for electric vehicles. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(2):171–187. doi: 10.17816/transsyst630045

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день наблюдается устойчивая тенденция к развитию электротранспорта по всему миру. Не последнюю роль в этом играет развитие литиевых батарей [1]. Ожидается, что в будущем электротранспорт и дальше будет развиваться и распространяться, поскольку он играет ключевую роль в снижении выбросов вредных веществ и уменьшении зависимости от ископаемых топлив, а также является наиболее подходящей платформой для развития автономного транспорта.

В то же время транспортный сектор оказывает наибольшее воздействие на окружающую среду и является одним из крупнейших потребителей энергии. На его долю приходится более 20% потребления [2]. Растущее присутствие электромобилей (ЭМ) на улицах заметно повлияло на электрические сети [3]. Преобладающий метод зарядки большинства существующих электромобилей, как дома, так и в дороге, предполагает зарядку по кабелю.

Однако, этот подход требует физического подключения кабелей к электромобилям, что является потенциально опасной задачей, особенно при неблагоприятных погодных условиях. Кроме того, следует принять во внимание, что искрение при подключении и отключении кабелей значительно ограничивает использование электромобилей в определенных ситуациях, таких как близость к заправочным станциям и аэропортам. Решением указанных проблем является беспроводная зарядка. Первые эксперименты по беспроводной передаче энергии (БПЭ) провел Никола Тесла в конце XIX века [4, 5]. История развития методов беспроводной передачи энергии кратко отражена в [6]. БПЭ — это процесс передачи мощности из одной цепи в другую без использования каких-либо подключенных проводящих элементов.

Предложенная нами идея автоматизации идентификации при помощи RFID-меток при зарядке электромобиля заключается в использовании технологии RFID для безопасной и удобной идентификации владельцев электромобилей в процессе зарядки. Каждый владелец электромобиля имеет уникальную RFID-метку, которая идентифицирует его в системе. При подъезде к зарядной станции владелец прикладывает метку к считывателю RFID, который автоматически распознает его и разрешает доступ к зарядной станции. Это обеспечивает безопасность и контроль доступа, предотвращает несанкционированное использование зарядных станций и облегчает процесс зарядки и оплаты для владельцев электромобилей.

## 1. МЕТОДЫ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

Прежде, чем приступить к реализации системы идентификации транспортных средств посредством RFID-меток следует рассмотреть существующие методы беспроводной передачи энергии и выбрать из них наиболее оптимальный, на базе которого будет осуществляться идея, описанная ранее. Классические методы беспроводной зарядки можно разделить на емкостную передачу энергии (ЕПЭ) и индуктивную передачу энергии (ИПЭ), среди них индуктивная передача энергии обычно считается более выгодным вариантом беспроводной зарядки [7–9]. Кроме этих вариантов есть еще и альтернативные электромагнитные и механические варианты: зарядка на основе вращающихся постоянных магнитов и способ передачи энергии с использованием микроволнового излучения и радиоволн.

### 1.1. Емкостная передача энергии (ЕПЭ)

В этом случае, система беспроводной зарядки ЕПЭ использует электрическое поле для передачи электроэнергии с минимальными потерями мощности, когда электрическое поле проходит через электрически изолированные металлические барьеры [10]. Мощность передается с помощью конденсаторов, изготовленных из металлических пластин, которые значительно дешевле катушек индуктивности.

Точное выравнивание между транспортным средством и зарядной площадкой имеет первостепенное значение в настройке зарядки с емкостной передачей энергии [11]. В этой установке используются четыре металлические пластины, которые образуют две емкостные связи для передачи энергии. Ориентация этих пластин может быть горизонтальной или вертикальной, в зависимости от конкретного применения. Система зарядки ЕПЭ особенно хорошо подходит для сценариев, связанных с короткими расстояниями и низкими требованиями к мощности [12].

Вместе с тем, расстояние между зарядной площадкой и транспортным средством обычно ограничено всего 1 мм, что снижает диапазон применения системы зарядки ЕПЭ. Топологию схемы ЕПЭ можно разделить на резонансную и нерезонансную. В нерезонансной топологии для процесса преобразования используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ), а конденсатор связи действует как элемент накопления энергии, обеспечивая стабильное питание схемы. С другой стороны, резонансная топология включает преобразователь класса «Е» и последовательный

резонансный преобразователь, в которой конденсатор связи резонирует вместе с дросселем [13].

### **1.2. Беспроводная зарядка на основе вращающихся постоянных магнитов**

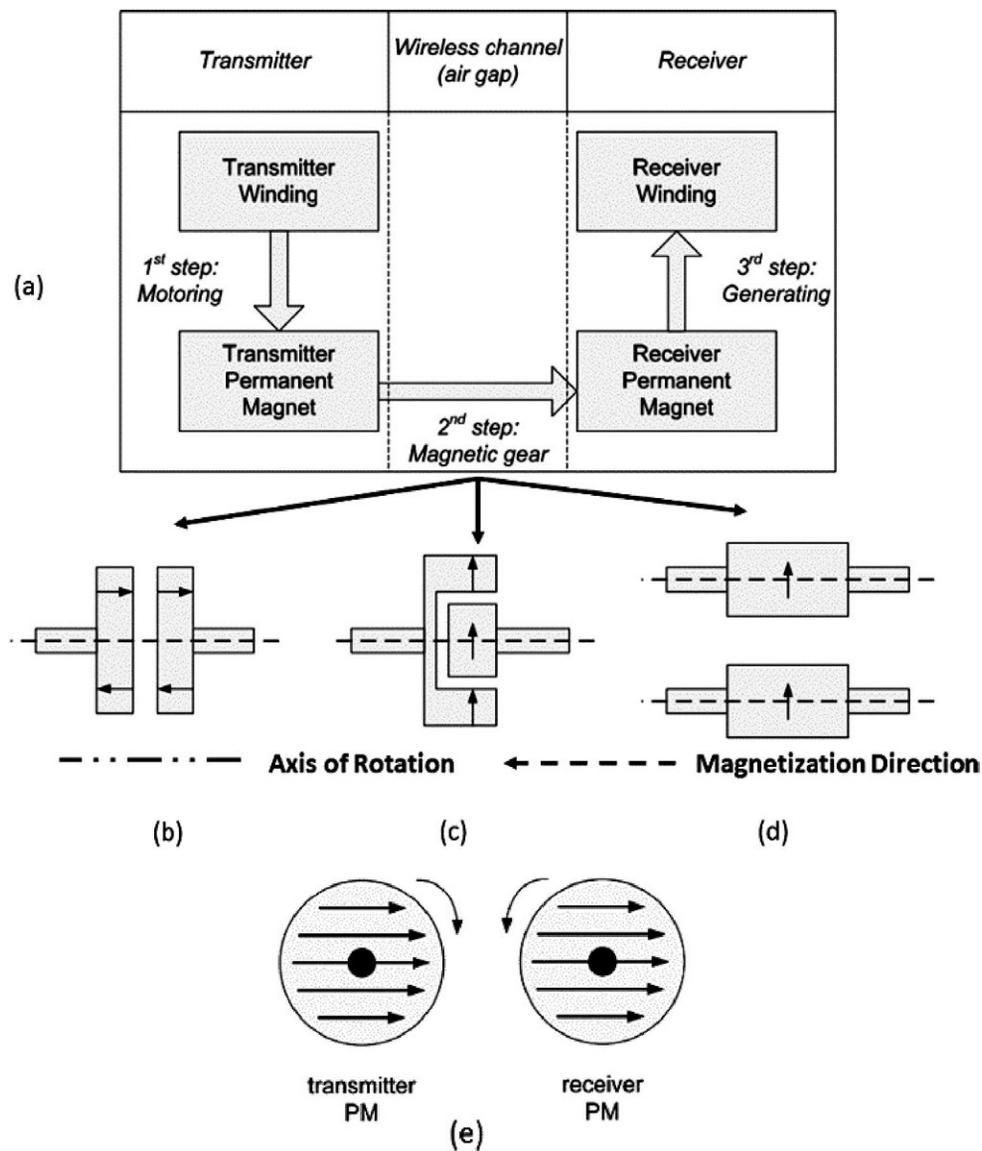
В университете Британской Колумбии разработан метод, использующий эффект магнитной передачи, при котором неодимовый постоянный магнит действует как магнитная муфта [14]. Ротор первичной стороны, намагниченный постоянным магнитом, вращает вторичный ротор с той же синхронной скоростью. Чович и др. [15] создали прототип с беспроводной системой передачи энергии на основе данной системы, достигнув эффективности 81% при передаче мощности на расстояние более 150 мм и частоте 150 Гц.

В исследовании [14] представлена диаграмма потока энергии (показанная на Рис. 1), иллюстрирующая механизм беспроводной передачи энергии и его реализацию. В указанном исследовании, кроме того, предложены три типа магнитной передачи, на Рис. 1(е) показана ориентация магнитного механизма. В случае передачи большой мощности муфта требует магнита большого размера, что значительно удорожает конструкцию.

Важно отметить, что эта система имеет ряд ограничений, в том числе, вибрации и шум, создаваемые ее механическими компонентами. Еще одним существенным недостатком является необходимость точного выравнивания и постоянного обслуживания механики. Следовательно, этот подход непригоден для зарядки электромобилей из-за его крупногабаритной конструкции, низкой эффективности, механического вращения и других связанных с этим факторов.

### **1.3. Беспроводная зарядка с использованием микроволнового излучения и радиоволн.**

Впервые способ беспроводной зарядки с использованием микроволнового излучения и радиоволн был применен в 1904 году Николой Тесла, который осуществил передачу энергии с помощью радиоволн частотой 150 кГц. Браун, в своём исследовании [6], изобрел и продемонстрировал БПЭ, управляя беспроводным вертолетом без батареи в 1964 году, используя магнетрон с частотой 2,45 ГГц. Дикинсон [15] добился передачи энергии с помощью микроволнового излучения на расстояние 1,6 км на частоте 2,45 ГГц и мощностью передачи 450 кВт в Голдстоуне, США, используя параболическую антенну и клистрон.



**Рис. 1.** Ориентация магнитного механизма для системы БПЭ (а) поток мощности; (б) роторы с аксиальным намагничиванием; (с) роторы с радиальным намагничиванием; (д) параллельные оси вращения (пунктирные линии) с радиально намагниченными роторами [14]

**Fig. 1.** Magnetic gear orientation for the WPT system (a) Power flow; (b) Axially magnetized rotors; (c) Radially magnetized rotors; (d) Parallel axes of rotation (dotted lines) with radially magnetized rotors [14]

После 1980-х годов исследования БПЭ получили импульс в контексте спутников солнечной энергии в Японии [16], при этом, значительную роль сыграл Киотский университет. Синохара [17], сотрудничающий с Киотским университетом, проводил исследования различных приложений микроволновых волн для коммерческих целей. Сотрудничая с Nissan Motors в период с 2003 по 2008 год, Синохара [17] разработал систему передачи энергии для зарядки электромобилей, в процессе движения по дороге, на частоте 2,45 ГГц [18]. В системе использовались щелевые антенны и магнетрон для снижения затрат, достигая эффективности зарядки аккумулятора на уровне 76%. Для дальнейшего повышения эффективности и сокращения времени зарядки они ввели диод Шоттки из нитрида галлия для выпрямления мощности.

Несмотря на то, что такая система зарядки и показала себя довольно хорошо, стоит отметить сложность ее применения в реальных условиях и, самое главное, ее дороговизну. Все ранее представленные способы зарядки электромобилей так или иначе не подходят для массового внедрения. Поэтому наиболее оптимальным и, как следствие, самым популярным в реализации на практике с точки зрения затрат, допустимого расстояния от зарядного устройства и простоты использования является индукционный способ зарядки [19].

#### **1.4. Индукционная передача энергии**

В 1999 году Сакамото и его коллеги [20] представили новый индуктивный способ передачи энергии, который достиг КПД 97% при выходной мощности 8,3 кВт через воздушный зазор 3 мм на частоте 100 кГц. В настоящее время индуктивная зарядка эффективна на коротких расстояниях, обычно в районе десятка сантиметров. Небольшие электронные устройства можно заряжать по беспроводной сети с воздушным зазором в несколько метров, но по мере увеличения требований к мощности передача энергии становится значительно сложнее [21].

Если необходимо зарядить мощное устройство, то следует использовать одно- или трехфазную систему зарядки [22]. Индуктивная передача энергии (ИПЭ) в настоящее время является основным методом беспроводной зарядки электромобилей [23, 24]. Система ИПЭ работает на принципе электромагнитной индукции, который является тем же принципом, который используется в трансформаторах для передачи мощности от первичной катушки к вторичной обмотке. Эффективность

передачи мощности в системе ИПЭ можно повысить за счет использования резонанса [25]. Электромобили можно заряжать как в неподвижном состоянии, так и в движении [25].

Система индуктивной беспроводной зарядки состоит из двух основных компонентов: передатчика, расположенного на подземной зарядной станции, и приемника, встроенного в электромобиль (см. Рис. 2). На функциональной схеме индукционного зарядного устройства, представленного на Рис. 2,  $V_{in}$  представляет входное напряжение постоянного тока.  $L_1$  и  $L_2$  обозначают индуктивность обмоток передатчика и приемника, а  $M$  представляет собой взаимную индуктивность между ними.  $C_1$  и  $C_2$  используются для обозначения компенсирующих конденсаторов. Следует отметить, что резисторы  $r_1$  и  $r_2$  обозначают совокупные потери катушек передатчика и приемника, включая потери в меди индуктивности и потери эквивалентного последовательного сопротивления (ESR) конденсаторов. Наконец,  $V_0$  обозначает напряжение зарядки.

Сторона передатчика включает в себя: преобразователь постоянного тока, инвертор, работающий на резонансной частоте установки беспроводной передачи энергии для минимизации рассеиваемой мощности [26], и блок управления для регулирования работы инвертора. На стороне приемника имеется выпрямитель и встроенное зарядное устройство, которое служит мостом между системой беспроводной передачи энергии и аккумулятором. Бортовое зарядное устройство отвечает за управление профилем зарядки аккумулятора электромобиля.

Функциональную схему можно обозначить эквивалентной электрической схемой, представленной на Рис. 3. Источник синусоидального напряжения передатчика,  $V_{inv}$ , отражает основную составляющую

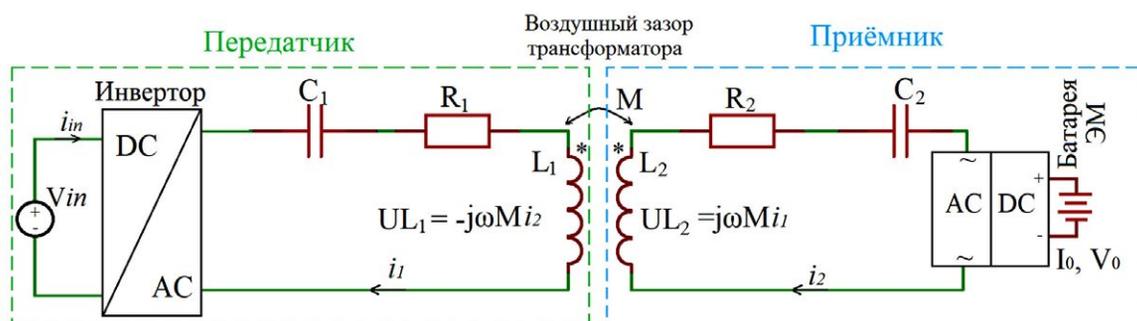
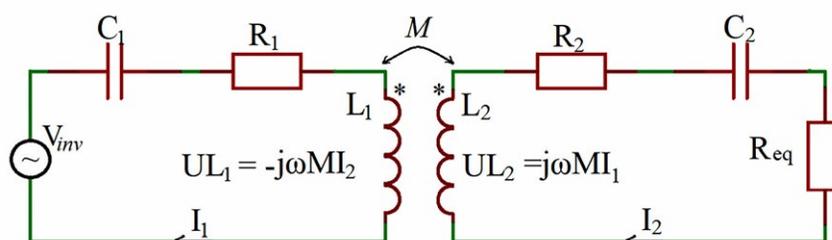


Рис. 2. Схема индукционного зарядного устройства (составлено авторами)

Fig. 2. Induction charger circuit



**Рис. 3.** Эквивалентная схема индукционного зарядного устройства  
(составлено авторами)

**Fig 3.** Equivalent circuit of induction charger

выходного напряжения высокочастотного инвертора.  $I_1$  и  $I_2$  обозначают основные составляющие тока на концах передатчика и приемника соответственно. Нагрузку аккумулятора в сочетании со встроенным зарядным устройством (одноступенчатым или двухступенчатым) можно адекватно смоделировать, используя эквивалентное сопротивление  $R_{eq}$ .

## 2. ИНТЕГРАЦИЯ RFID В СИСТЕМУ БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ ПРИ ПОМОЩИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА СЕРИИ STM

В последние годы технология радиочастотной идентификации (RFID) получила широкое распространение в различных приложениях. RFID – удобное средство передачи информации. Другие преимущества включают длительный срок службы, доступность, а также возможность повторного использования и переработки [27]. RFID-метки состоят из микрочипа и антенны, которые обмениваются данными со считывателем по беспроводной сети.

RFID-метки можно разделить на пассивные и активные. Пассивные RFID-карты работают на частоте 125 кГц и используют энергию магнитного поля, создаваемого модулем считывания. Эта мощность используется для подачи питания в цепи микрочипа, обеспечивая передачу информации обратно к считывателю.

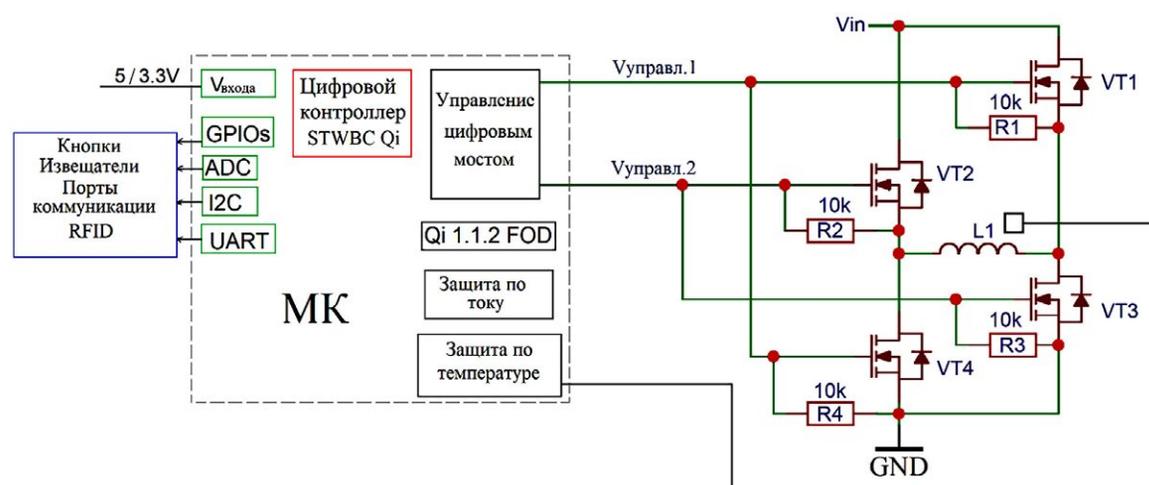
Активные RFID-метки требуют отдельного источника питания и могут вмещать до 1 МБ памяти для чтения/записи. Каждая RFID-карта имеет уникальный идентификатор, который может быть расшифрован RFID-считывателем. Например, RFID-считыватель EM-18 работает на частоте 125 кГц и питается от источника питания 5 В. Он обеспечивает как последовательный выход, так и выход Weigand и охватывает диапазон около 8–12 см. Данные, создаваемые RFID-считывателем EM-18, имеют

12-значный формат ASCII, где первые 10 цифр обозначают номер карты, а последние две цифры являются результатом вычисления XOR, используемого для проверки ошибок.

RFID можно подключить к микроконтроллеру STM в несколько этапов:

- Выбрать RFID-модуль, совместимый с микроконтроллером STM32. Доступны различные типы модулей RFID, например, RC522 и PN532.
- Подключить RFID-модуль к микроконтроллеру STM, используя соответствующие контакты. Модуль RFID обычно имеет контакты для питания, заземления, ввода и вывода данных.
- Настроить микроконтроллер STM для связи с RFID-модулем. Это предполагает программирование микроконтроллера для отправки команд RFID-модулю и получения от него данных. Мы можем использовать интерфейс SPI, I<sup>2</sup>C или UART для связи с модулем RFID, в зависимости от протокола связи модуля.
- Написать код интерфейса для связи с RFID-модулем, его инициализации, отправки команд и получения данных.

Например, контроллер «STWBC Qi» можно использовать в качестве управляющего устройства для беспроводной передачи энергии посредством магнитной индукции (см. Рис. 4). Кроме того, его наличие упрощает подключение RFID-приемника, датчиков температуры, тока, устройств защиты и иных средств связи для передачи данных с возможностью



**Рис. 4.** Функциональная схема индукционной зарядки на примере STWBC Qi (составлено авторами)

**Fig. 4.** Functional diagram of induction charging based on STWBC Qi

производства вычислений в облачных сервисах, проще говоря внедриться в IoT-систему целого города.

Функциональная схема на Рис. 4 дает обзор ключевых компонентов «STWBC Qi» и того, как они взаимодействуют для обеспечения беспроводной зарядки в соответствии со стандартом Qi. Разбивку его основных элементов можно представить в следующем виде:

1. Управление входной мощностью. Этот раздел управляет подачей питания на передатчик. Он может включать в себя такие компоненты, как выпрямители, регуляторы напряжения и фильтры, чтобы обеспечить стабильную подачу электроэнергии в остальную часть системы.
2. Блок микроконтроллера (МК). Он служит мозгом передатчика, координируя различные функции и процессы. Он может контролировать поток энергии, управлять связью с приемным устройством, отслеживать состояние зарядки и реализовывать функции безопасности.
3. Интерфейс связи. Это позволяет передатчику взаимодействовать с приемным устройством по протоколу Qi. Он выполняет такие задачи, как обнаружение устройств, согласование уровней мощности и обмен данными, связанными с состоянием и параметрами зарядки.
4. Схема драйвера катушки. Эта секция приводит в действие катушку(и) передатчика для создания переменного магнитного поля, необходимого для беспроводной передачи энергии. Обычно он включает в себя усилители мощности и схемы управления для регулировки частоты и амплитуды передаваемого сигнала.
5. Обратная связь и контуры управления. Эти контуры постоянно контролируют процесс зарядки и при необходимости корректируют параметры для оптимизации эффективности и обеспечения безопасной работы. Обратная связь может исходить от датчиков, измеряющих такие факторы, как температура катушки, напряжение и ток.
6. Механизмы защиты. В передатчике реализованы различные функции защиты для предотвращения перезаряда, перегрева, короткого замыкания и других потенциально опасных условий. К ним могут относиться датчики температуры, ограничители тока и мониторы напряжения.
7. Пользовательский интерфейс (например, через UART). Некоторые передатчики включают элементы пользовательского интерфейса,

такие как кнопки или сенсорные элементы управления для ручного взаимодействия. Они могут позволить пользователям инициировать зарядку, изменять настройки или выполнять другие действия.

В целом функциональная схема Qi Transmitter STWBC иллюстрирует, как он сочетает в себе аппаратные и программные компоненты для обеспечения эффективной и надежной беспроводной зарядки в соответствии со стандартом Qi.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Индуктивные зарядные станции являются наиболее предпочтительным вариантом, поскольку площадь приема и передачи электрической энергии измеряется несколькими сантиметрами, что достаточно для преодоления воздушного зазора между поверхностью дороги и днищем автомобиля, где потенциально может располагаться приемник.

С другой стороны, было показано, что емкостная беспроводная зарядка не подходит для зарядки электромобилей из-за требуемого минимального воздушного зазора (несколько миллиметров) и высоких требований к расположению пластин конденсатора.

Результаты исследования продемонстрировали, что контроллер серии «STWBC Qi» не только обеспечивает интеграцию RFID-идентификации, но также является ключевым компонентом для управления системой индуктивной беспроводной зарядки.

### Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

### The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Возмилов А.Г., Панишев С.А., Лисов А.А. Исследование и математическое моделирование литий-ионного аккумулятора // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2022. Т. 22, №. 2. С. 30–36. EDN: OJAEVM doi: 10.14529/power220203
2. Neubaum H., Biermann F. Integrating global energy and climate governance: The changing role of the International Energy Agency // Energy Policy. 2015. Vol. 87. P. 229–239. doi: 10.1016/j.enpol.2015.09.009

3. Sachan S., Adnan N. Stochastic charging of electric vehicles in smart power distribution grids // *Sustainable cities and society*. 2018. Vol. 40. P. 91–100. doi: 10.1016/j.scs.2018.03.031
4. Tesla N. Experiments with alternate currents of very high frequency and their application to methods of artificial illumination // *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* 1891. Vol. 8, N. 1. P. 266–319.
5. Patent U.S.A. 1119732. 1914. Tesla N. Apparatus for transmitting electrical energy. Accessed: 23.07.2023. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/8a/95/f3/1b1780c6941fb9/US1119732.pdf>
6. Brown W.C. The history of power transmission by radio waves // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 1984. Vol. 32, N. 9. P. 1230–1242. doi: 10.1109/TMTT.1984.1132833
7. Dai J., Ludois D.C. A survey of wireless power transfer and a critical comparison of inductive and capacitive coupling for small gap applications // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015. Vol. 30, N. 11. P. 6017–6029. doi: 10.1109/TPEL.2015.2415253
8. Wang Y., Dongye Z., Zhang H., et al. A domino-type load-independent inductive power transfer system with hybrid constant-current and constant-voltage outputs. // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021. Vol. 36, N. 8. P. 8824–8834. doi: 10.1109/TPEL.2021.3055363
9. Mahesh A., Chokkalingam B., Mihet-Popa L. Inductive wireless power transfer charging for electric vehicles—a review. *IEEE access*. 2021; 9:137667-713. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116678
10. Mostafa T.M., Muharam A., Patrick Hu.A., Hattori R. Improved CPT system with less voltage stress and sensitivity using a step-down transformer on receiving side // *IET Power Electronics*. 2018. Vol. 12, N. 10. P. 2634–2641. doi: 10.1049/iet-pel.2018.6206
11. Luo B., Mai R., Guo L., et al. LC–CLC compensation topology for capacitive power transfer system to improve misalignment performance // *IET Power Electronics*. 2019. Vol. 12, N. 10. P. 2626–2633. doi: 10.1049/iet-pel.2018.5606
12. Pardo-Bosch F., Pujadas P., Morton C., Cervera C. Sustainable deployment of an electric vehicle public charging infrastructure network from a city business model perspective // *Sustainable Cities and Society*. 2021. Vol. 71. P. 102957. doi: 10.1016/j.scs.2021.102957
13. Vu V.B., Dahidah M., Pickert V., Phan V.T. An improved LCL-L compensation topology for capacitive power transfer in electric vehicle charging // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 27757–27768. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2971961
14. Li W. High efficiency wireless power transmission at low frequency using permanent magnet coupling [dissertation]. University of British Columbia, 2009. doi: 10.14288/1.0067661
15. Dickinson R.M. Performance of a high-power, 2.388-GHz receiving array in wireless power transmission over 1.54 km. In: *IEEE-MTT-S International Microwave Symposium*. 1976. P. 139–141. doi: 10.1109/MWSYM.1976.1123672

16. Matsumoto H. Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan // *IEEE microwave magazine*. 2002. Vol. 3, N. 4. P. 36–45. doi: 10.1109/MMW.2002.1145674
17. Shinohara N. Wireless power transmission progress for electric vehicle in Japan. In: *IEEE Radio and Wireless Symposium*. 2013. P. 109–111. doi: 10.1109/RWS.2013.6486657
18. Shinohara N. Beam efficiency of wireless power transmission via radio waves from short range to long range // *Journal of the Korean Institute of Electromagnetic and Science*. 2010. Vol. 10, N. 4. P. 224–230.
19. Лисов А.А. Обзор способов передачи энергии для беспроводной зарядки электромобилей. В кн.: *Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых*. 2023. Т. 11, № 1. С. 33–35. EDN: LBCMAA
20. Sakamoto H., Harada K., Washimiya S., Takehara K., Matsuo Y., Nakao F. Large air-gap coupler for inductive charger [for electric vehicles] // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1999. Vol. 35, N. 5. P. 3526–3528. doi: 10.1109/20.800578
21. Hui S.Y. Planar wireless charging technology for portable electronic products and Qi // *Proceedings of the IEEE*. 2013. Vol. 101, N. 6. P. 1290–1301. doi: 10.1109/JPROC.2013.2246531
22. El-Shahat A., Ayisire E., Wu Y., et al. Electric vehicles wireless power transfer state-of-the-art // *Energy Procedia*. 2019. Vol. 62, N. 1. P. 24–37. doi: 10.1016/j.egypro.2019.04.004
23. Gönül Ö., Duman A.C., Güler Ö. Electric vehicles and charging infrastructure in Turkey: An overview // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 143. P. 110913. doi: 10.1016/j.rser.2021.110913
24. Abdelhalim E.A., Ei-Khayat G.A. A survey on analytical approaches used in RFID based applications. In: *International Conference on Computer Applications Technology (ICCAT)*. 2013. P. 1–6. doi: 10.1109/ICCAT.2013.6521960
25. Mou X., Gladwin D.T., Zhao R., Sun H. Survey on magnetic resonant coupling wireless power transfer technology for electric vehicle charging // *IET Power Electronics*. 2019. Vol. 12, N. 12. P. 3005–3020. doi: 10.1049/iet-pel.2019.0529
26. Baros D., Rigogiannis N., Drougas P., et al. Transmitter side control of a wireless EV charger employing IoT // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 227834–227846. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3045803
27. Landt J. The history of RFID // *IEEE potentials*. 2005. Vol. 24, N. 4. P. 8–11. doi: 10.1109/MP.2005.1549751

## REFERENCES

1. Vozmilov AG, Panishev SA, Lisov AA. Study and mathematical modeling of a lithium-ion battery. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2022;22(2):30–36. (In Russ.) EDN: OJAEVM doi: 10.14529/power220203

2. Heubaum H, Biermann F. Integrating global energy and climate governance: The changing role of the International Energy Agency. *Energy Policy*. 2015;87:229–239. doi: 10.1016/j.enpol.2015.09.009
3. Sachan S, Adnan N. Stochastic charging of electric vehicles in smart power distribution grids. *Sustainable cities and society*. 2018;40:91–100. doi: 10.1016/j.scs.2018.03.031
4. Tesla N. Experiments with alternate currents of very high frequency and their application to methods of artificial illumination. *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* 1891;8(1):266–319.
5. Patent U.S.A. 1119732. 1914. Tesla N. Apparatus for transmitting electrical energy. Accessed: 23.07.2023. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/8a/95/f3/1b1780c6941fb9/US1119732.pdf>
6. Brown WC. The history of power transmission by radio waves. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 1984;32(9):1230–42. doi: 10.1109/TMTT.1984.1132833
7. Dai J, Ludois DC. A survey of wireless power transfer and a critical comparison of inductive and capacitive coupling for small gap applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015;30(11):6017–29. doi: 10.1109/TPEL.2015.2415253
8. Wang Y, Dongye Z, Zhang H, et al. A domino-type load-independent inductive power transfer system with hybrid constant-current and constant-voltage outputs. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021;36(8):8824–34. doi: 10.1109/TPEL.2021.3055363
9. Mahesh A, Chokkalingam B, Mihet-Popa L. Inductive wireless power transfer charging for electric vehicles—a review. *IEEE access*. 2021;9:137667–713. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116678
10. Mostafa TM, Muharam A, Patrick Hu A, Hattori R. Improved CPT system with less voltage stress and sensitivity using a step-down transformer on receiving side. *IET Power Electronics*. 2018;12(10):2634–41. doi: 10.1049/iet-pel.2018.6206
11. Luo B, Mai R, Guo L, Wu D, He Z. LC–CLC compensation topology for capacitive power transfer system to improve misalignment performance. *IET Power Electronics*. 2019;12(10):2626–33. doi: 10.1049/iet-pel.2018.5606
12. Pardo-Bosch F, Pujadas P, Morton C, Cervera C. Sustainable deployment of an electric vehicle public charging infrastructure network from a city business model perspective. *Sustainable Cities and Society*. 2021;71:102957. doi: 10.1016/j.scs.2021.102957
13. Vu VB, Dahidah M, Pickert V, Phan VT. An improved LCL-L compensation topology for capacitive power transfer in electric vehicle charging. *IEEE Access*. 2020;8:27757–68. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2971961
14. Li W. High efficiency wireless power transmission at low frequency using permanent magnet coupling [dissertation] University of British Columbia; 2009. doi: 10.14288/1.0067661
15. Dickinson RM. Performance of a high-power, 2.388-GHz receiving array in wireless power transmission over 1.54 km. In: *IEEE-MTT-S International Microwave Symposium*. 1976:139–141. doi: 10.1109/MWSYM.1976.1123672

16. Matsumoto H. Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan. *IEEE microwave magazine*. 2002;3(4):36–45. doi: 10.1109/MMW.2002.1145674
17. Shinohara N. Wireless power transmission progress for electric vehicle in Japan. In: *IEEE Radio and Wireless Symposium*. 2013:109–111. doi: 10.1109/RWS.2013.6486657
18. Shinohara N. Beam efficiency of wireless power transmission via radio waves from short range to long range. *Journal of the Korean Institute of Electromagnetic and Science*. 2010;10(4):224–30.
19. Lisov AA. Обзор способов передачи энергии для беспроводной зарядки электромобилей. In: *Energo- i resursosberezhenie v teploenergetike i social'noj sfere: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov, uchenyh*. 2023;11(1):33–35. EDN: LBCMAA
20. Sakamoto H, Harada K, Washimiya S, et al. Large air-gap coupler for inductive charger [for electric vehicles]. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1999;35(5):3526–8. doi: 10.1109/20.800578
21. Hui SY. Planar wireless charging technology for portable electronic products and Qi. *Proceedings of the IEEE*. 2013;101(6):1290–301. doi: 10.1109/JPROC.2013.2246531
22. El-Shahat A, Ayisire E, Wu Y, Rahman M, Nelms D. Electric vehicles wireless power transfer state-of-the-art. *Energy Procedia*. 2019;62(1):24–37. doi: 10.1016/j.egypro.2019.04.004
23. Gönül Ö, Duman AC, Güler Ö. Electric vehicles and charging infrastructure in Turkey: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;143:110913. doi: 10.1016/j.rser.2021.110913
24. Abdelhalim EA, Ei-Khayat GA. A survey on analytical approaches used in RFID based applications. In: *International Conference on Computer Applications Technology (ICCAT)*. 2013:1–6. doi: 10.1109/ICCAT.2013.6521960
25. Mou X, Gladwin DT, Zhao R, Sun H. Survey on magnetic resonant coupling wireless power transfer technology for electric vehicle charging. *IET Power Electronics*. 2019;12(12):3005–20. doi: 10.1049/iet-pel.2019.0529
26. Baros D, Rigogiannis N, Drougas P, et al. Transmitter side control of a wireless EV charger employing IoT. *IEEE Access*. 2020;8:227834–46. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3045803
27. Landt J. The history of RFID. *IEEE potentials*. 2005;24(4):8–11. doi: 10.1109/MP.2005.1549751

### Сведения об авторах:

**Лисов Андрей Анатольевич**, аспирант;

eLibrary SPIN: 1956-3662; ORCID: 0000-0001-7282-8470;

E-mail: lisov.andrey2013@yandex.ru

**Панишев Сергей Алексеевич**, аспирант;

eLibrary SPIN: 2676-5207; ORCID: 0000-0003-2753-2341;

E-mail: panishef.serega@mail.ru

**Information about the authors:**

**Andrey A. Lisov**, postgraduate student,  
eLibrary SPIN: 1956-3662; ORCID: 0000-0001-7282-8470;  
E-mail: lisov.andrey2013@yandex.ru

**Sergei A. Panishev**, postgraduate student;  
eLibrary SPIN: 2676-5207; ORCID: 0000-0003-2753-2341;  
E-mail: panishef.serega@mail.ru

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

<https://doi.org/10.17816/transsyst625423>

© А.В. Лунина, Е.В. Кучерявая, Г.А. Аверченко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
(Санкт-Петербург, Россия)

## МОСТЫ С БАЛКАМИ КОМБИНИРОВАННОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Объектом исследования данной статьи являются мосты с балками комбинированного сечения из клееной древесины и железобетонной плитой. Главной целью исследования является сравнение основных характеристик железобетонных, клееных, стальных, а также комбинированных мостов. Сравнение проводится по трем основным параметрам: стоимость, длительность эксплуатации, грузоподъемность. Инновационность использования клееной древесины в строительстве мостов заключается в сочетании прочности и эластичности древесины с прочностью и долговечностью железобетона, что позволяет создавать более устойчивые и экономичные конструкции, которые способны выдерживать большие нагрузки. Анализ основных характеристик таких мостов позволяет сделать вывод о преимуществах такого сочетания материалов перед другими типами мостов. Полученные данные могут быть полезными для проектировщиков и строителей при выборе оптимального материала для строительства мостовой конструкции.

**Ключевые слова:** клееная древесина; железобетон; строительство; пролетные строения.

### Как цитировать:

Лунина А.В., Кучерявая Е.В., Аверченко Г.Л. Мосты с балками комбинированного сечения из клееной древесины и железобетона // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 188–199. doi: 10.17816/transsyst625423

---

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© **A.V. Lunina, E.V. Kucheryavaya, G.A. Averchenko**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
(St. Petersburg, Russia)

## **BRIDGES WITH BEAMS OF COMBINED CROSS SECTION MADE OF GLUED WOOD AND REINFORCED CONCRETE**

This article focuses on bridges with beams of combined cross section made of glued wood and reinforced concrete. The main purpose of the study is to compare the key characteristics of reinforced concrete, glued wood, and combined bridges. The comparison is based on three main parameters: cost, operational lifespan, and load capacity. The innovation of the use of glued wood in the construction of bridges lies in a combination of the strength and elasticity of wood with the strength and durability of reinforced concrete, which allows you to create more stable and economical structures that can withstand heavy loads. An analysis of the main characteristics of these such bridges allows us to conclude that the advantages of such a combination of materials over other types of bridges. The data obtained can be useful for designers and builders when choosing optimal material for the construction of a bridge structure.

**Keywords:** glued wood; reinforced concrete; construction; superstructures.

### **To cite this article:**

Lunina AV, Kucheryavaya EV, Averchenko GA. Bridges with beams of combined cross section made of glued wood and reinforced concrete. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(2):188–199. doi: 10.17816/transsyst625423

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается увеличение интереса к применению древесины в строительстве мостов. Одним из наиболее перспективных решений является сочетание клееной древесины и железобетона. Это комбинированное сечение позволяет достичь оптимального сочетания прочности и долговечности материалов, а также обеспечивает экономическую эффективность строительства и эксплуатации моста. Ниже рассматриваются преимущества и недостатки клееной древесины в строительстве пролетных строений.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Если применение клееной древесины в мостах в качестве конструкционного материала не вызывает сомнений и реализовано в практике зарубежного и отечественного мостостроения, то целесообразность ее использования в сочетании с железобетоном приходится доказывать на научном и практическом уровне.

Практика отечественного и зарубежного строительства показывает, что в условиях труднопрогнозируемого роста интенсивности транспортных потоков, индустриализации, изменения климата существенно меняется представление о долговечности мостов.

Всесторонняя оценка реальных сроков эксплуатации железобетонных и стальных мостов определила срок их службы в 30–35 лет, деревянных – в среднем 50 лет. Проведенное в США сравнение стоимости постройки мостов из стали, железобетона и дерева показало, что если стоимость деревянного моста принять за 1, то стоимость металлического равна 1,5, а железобетонного – 3,1 [1].

Ученые, инженеры и проектировщики при исследовании и проектировании мостовых конструкций уделяют все больше внимания древесине как материалу, обеспечивающему длительные сроки нормальной эксплуатации моста.

При использовании материала в мостовом сооружении очень важно создать условия для реализации его долговечности. Необходимая долговечность клееной древесины балок может обеспечиваться созданием нормальных условий эксплуатации. Последняя учитывается при разработке полотна проезжей части, исключающего попадание воды с проезжей части на клееные балки. Защита древесины от увлажнения является необходимым условием ее длительной работы, поскольку

при насыщении волокон до влажности 20% и более начинается активная биологическая деятельность – гниение древесины.

Широко распространенная дощато-гвоздевая плита с течением времени теряет первоначальную спланируемость дощатого набора вследствие расшатывания гвоздей при воздействии подвижных нагрузок. Клеевая древесноплита со временем также теряет плотность набора, вследствие расшатывания швов. При обследовании состояния клееной древесины в мостовом сооружении было определено, что в четырех из шести обследованных мостах разрушена древесноплита.

### **ПРИМЕНЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ**

Применение железобетонной плиты в мостах с балками комбинированного сечения из клееной древесины позволяет решить ряд проблем, возникающих при эксплуатации пролетного строения моста.

В случае применения железобетонной плиты выполняются не только защитные функции с созданием комфортных условий для клееной древесины балок, но и существенно лучше деревянных плит распределяется временная нагрузка на проезжей части.

Эффективность использования железобетонной плиты увеличивается, если ее объединить с деревоклееными ребрами различного вида связями. По данным [2], высота клееных балок уменьшается в 1,5 раза, а скалывающие напряжения – в 2 раза в случае объединенного комбинированного сечения.

Железобетонные плиты на деревянных балочных мостах становятся все более распространенным явлением на дорогах США и Канады. По данным университета штата Вирджиния, за последние 50 лет многие из 50 тысяч мостов в США с деревянными проезжими частями были заменены железобетонными плитами.

Одним, и самым важным, недостатком железобетонной плиты является значительная собственная масса, что сказывается на нагрузке на мост, особенно с увеличением перекрываемого пролета. В настоящее время существует ряд конструктивных приемов, таких как применение легких бетонов и другие мероприятия, существенно уменьшающие этот недостаток. Каркас из клееной древесины имеет вес почти в пять раз меньше, чем такой же каркас из железобетона. При этом на монтаж изделий из клееной древесины уходит в два раза меньше трудозатрат [3].

## СТОИМОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА

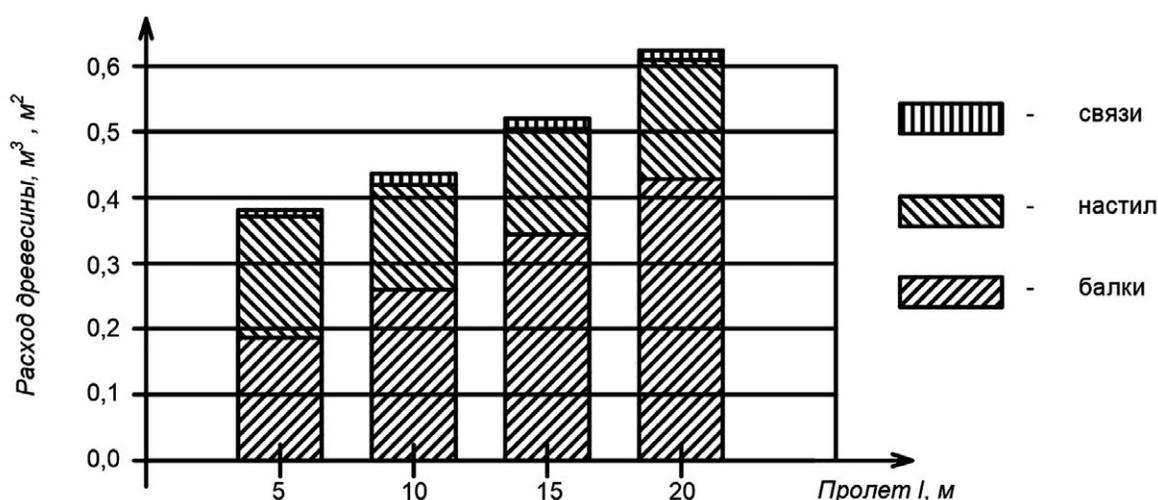
Экономическое сравнение в большинстве случаев является определяющим при выборе той или иной системы моста, материала, способов возведения и т.д.

Стоимость деревянного моста в современном исполнении составляет 2/3 стоимости-стального или железобетонного моста [4]. В случае железобетонного варианта почти 90% вложенных средств уходит в дорогостоящий железобетон и только 10% составляют другие статьи расходов. Применение пролетных строений из клееной древесины при уменьшении вложений на 34% позволяет создавать дополнительные рабочие места (фонд оплаты труда в 4 раза выше аналога) [5].

Самые последние расчеты, выполненные в 1992 г. в рамках программы «Развитие деревянных мостов» в Финляндии наглядно демонстрируют экономическую целесообразность использования железобетонной плиты, работающей совместно с ребрами из клееной древесины.

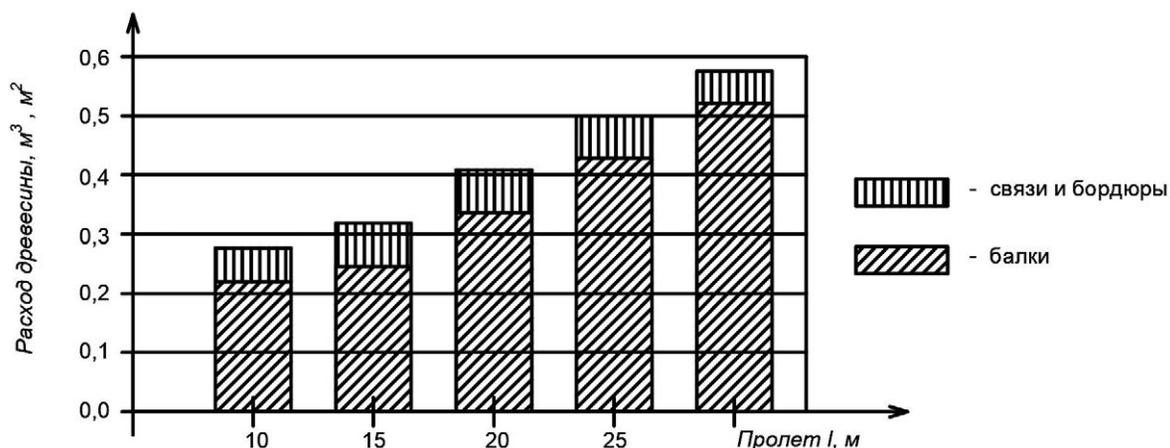
На Рис. 1–3 приведены расходы древесины и расчетные стоимости пролетного строения автодорожных балочных мостов.

Расход клееной древесины на балки в случае железобетонной плиты меньше, чем у деревянной, и составляет 76% при пролете 20 м. На графиках, представленных на Рис. 3, показано уменьшение стоимости



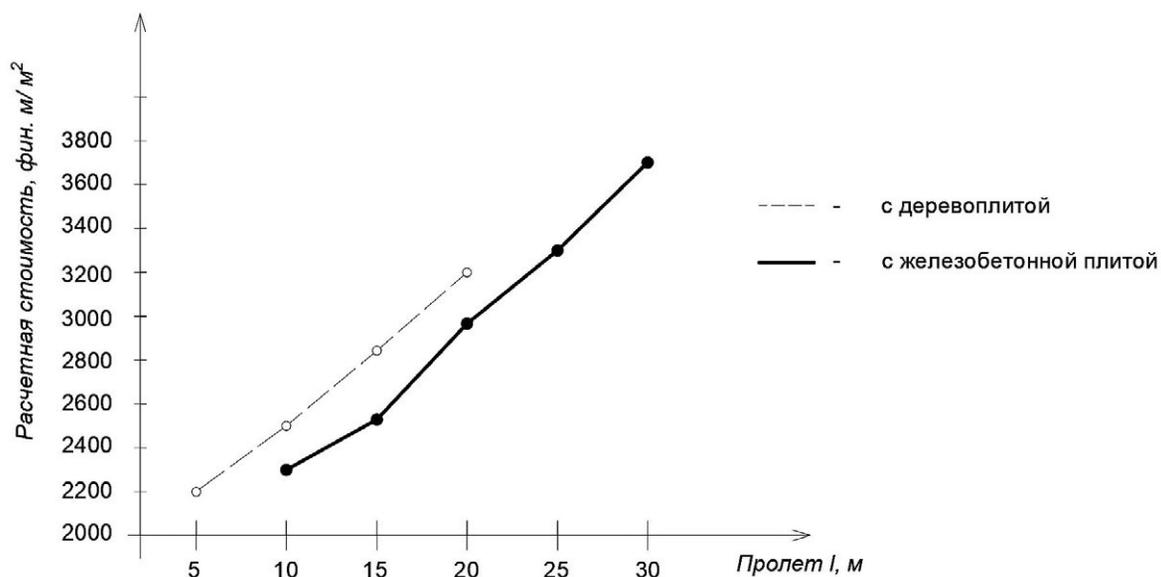
**Рис. 1.** Расход древесины на пролетное строение с деревоплитой проезжей части балочного моста для дорожного движения (ширина моста 4,5 м)

**Fig. 1.** Consumption of wood for a superstructure from a wood-lined roadway of a girder bridge for road traffic (bridge width 4.5 m)



**Рис. 2.** Расход древесины на пролетное строение с железобетонной плитой проезжей части балочного моста для дорожного движения (ширина моста 4,5 м)

**Fig. 2** Wood consumption for a superstructure with a reinforced concrete slab of the roadway of a girder bridge for road traffic (bridge width 4.5 m)



**Рис. 3.** Расчетные стоимости пролетного строения балочных мостов для дорожного движения (ширина моста 4,5 м, стоимость покрытия не учитывается)

**Fig. 3.** Estimated costs of the span of girder bridges for road traffic (bridge width 4.5 m, cost of coverage is not taken into account)

1 м<sup>2</sup> пролетного строения с железобетонной плитой по сравнению с использованием деревоплиты на 32,0–21,5% в пределах сравниваемых пролетов.

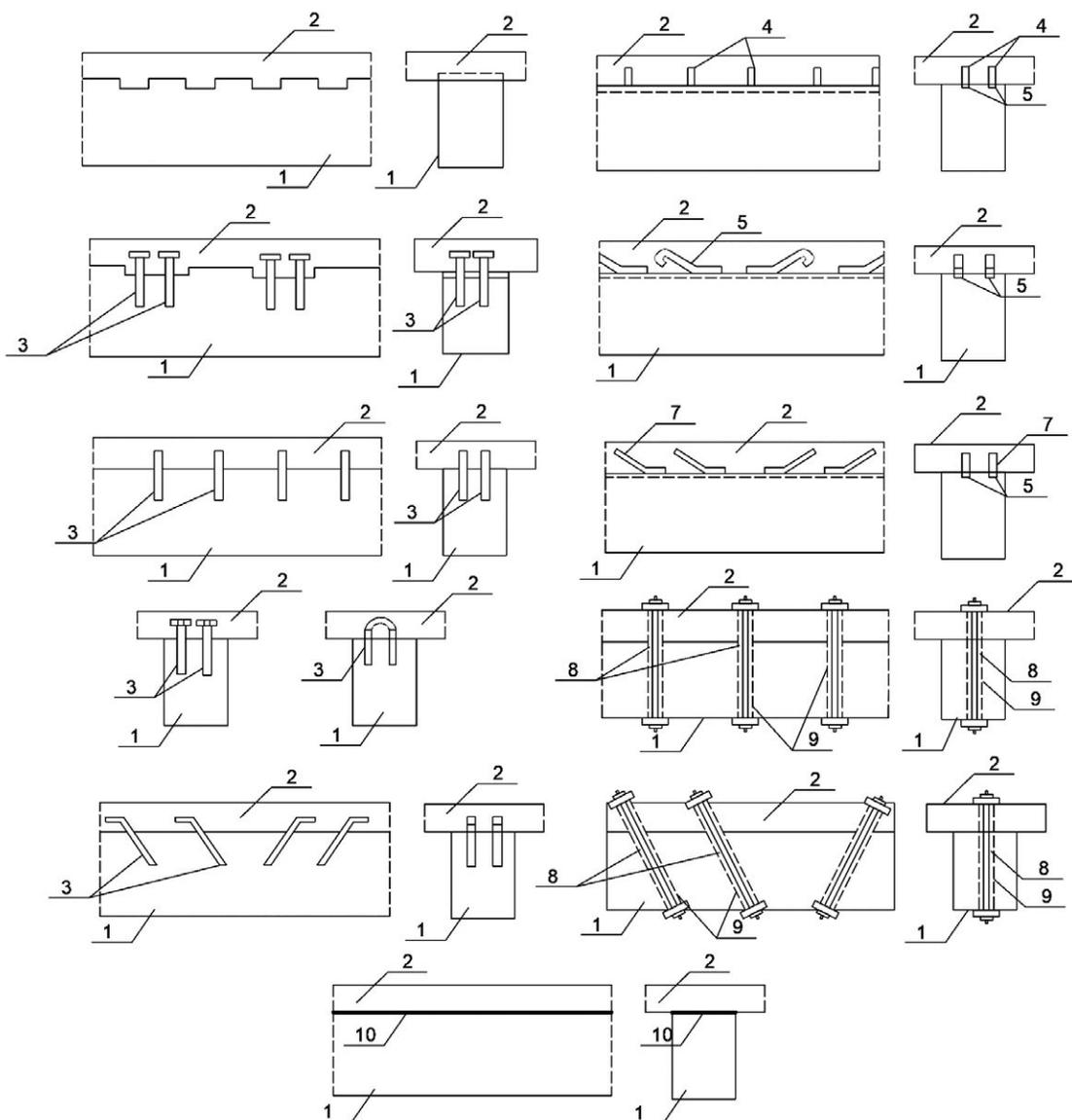
На Рис. 4 приведены типы соединений железобетонной плиты с деревоклееным ребром.

В 1967 г. Гипроавтотрансом, а в 1981 г. Союздорпроектом были разработаны типовые проекты пролетных строений с клееными балками для автодорожных мостов на дорогах IV–V категорий. Проектным институтом Гипроавтотранс были также разработаны типовые проекты деревянных балок длиной 12, 15 и 18 м со сборной и монолитной железобетонной плитой проезжей части.

Несмотря на рост применения клееной древесины в строительстве, в настоящее время число отечественных мостов, построенных из клееной древесины, не превышает сотни/нескольких десятков, а из клееной древесины с железобетонной плитой – единицы. Причинами этого явились дороговизна клееной древесины и низкое качество ее отечественного производства, вследствие чего пролетное строение не отвечает современным требованиям, предъявляемым к строительству.

Постепенное накапливание дефектов или склонности к дефектам, начиная с уменьшения экологичности и прочностных характеристик материала из-за некачественного клееного состава, используемого при изготовлении [6], нарушений технологии производства, хранения, транспортировки, монтажа клееных балок и, заканчивая часто несовершенствами конструкции проезжей части и режима эксплуатации, привели к интенсивному расслоению клееных швов в первые годы эксплуатации мостового сооружения. Если к этому добавить, что стоимость 1 м<sup>3</sup> клееной древесины превышала стоимость исходных пиломатериалов не на 70%, а в 2 с лишним раза и доходила до 300–500 р./м<sup>3</sup> (в ценах 1983 г.), то понятно «прохладное» отношение к этому материалу. С другой стороны, в прежние времена существовали традиционные трудности любого внедрения в любой отрасли промышленности.

На семинаре мостовиков России в марте 1995 г. (Мамонтовка, Московской обл.) заместитель управляющего Федерального дорожного департамента России О.Н. Скворцов отметил необходимость изменения отношения к деревянным мостам. Он сказал, что одним из важных направлений отечественного мостостроения должно стать экономически обоснованное применение древесины в пролетных строениях мостов на железобетонных опорах.



**Рис. 4.** Типы соединений железобетонной плиты с деревоклееной балкой:  
 1 – деревоклееная балка; 2 – железобетонная плита; 3 – стальной нагель;  
 4 – стальной стерженьковый упор; 5 – связывающая основа; 6 – одиночный стальной анкер; 7 – петлевой стальной анкер; 8 – напряженные болты или пряди;  
 9 – отверстие; 10 – клеевой шов

**Fig. 4.** Types of joints of reinforced concrete slab with a wood-glued beam:  
 1 – wood-glued beam; 2 – reinforced concrete slab; 3 – steel nail; 4 – steel rod stop;  
 5 – binding base; 6 – single steel anchor; 7 – looped steel anchor; 8 – stressed bolts or strands;  
 9 – hole; 10 – adhesive seam

Сопряжение и соединение различных частей конструкции не вызывает много затрат, что упрощает технологию ее изготовления.

Россия располагает примерно двумя десятками заводов и цехов клееных конструкций, занимает первое место в мире по запасам древесины, из них 44 млрд. м<sup>3</sup> – спелая и перестойная. При ежегодном приросте 900 млн. м<sup>3</sup> фактические заготовки снизились до 300 млн. м<sup>3</sup>, что связано с экономическими трудностями лесопромышленного комплекса.

На автомобильных дорогах нашей страны «значительная часть мостов была построена в 50–60-е годы. В настоящее время более 50% мостов не удовлетворяют современным нормативам по грузоподъемности и габаритам, требуют усиления и уширения» [7].

Очевидно, что часть этих мостов требует замены, и здесь вполне правомерно применение пролетных строений с балками комбинированного сечения из клееной древесины и железобетона.

**Таблица.** Основные свойства пролетных строений из клееной древесины, стали и железобетона

**Table.** Basic properties of spans made of laminated wood, steel and reinforced concrete

Параметры сравнения	Клееная древесина	Железобетон	Сталь
Модуль упругости E, кг/см <sup>2</sup> [8, 9]	80000–100000 (в зависимости от породы дерева)	$E_s=2*10^6$ $E_b=2,7*10^5$	$2,2*10^6$
Прочность, МПа [8, 9]	14–50	10–75	300–900
Плотность, кг/м <sup>3</sup> [8, 9]	350–460	2500	7700–7900
Минимальная усадка, %	0,5–1	До 3	0,7–2,2
Антисейсмические свойства	Конструкции способны выдержать землетрясение до 9 баллов по шкале Рихтера	Конструкции способны выдержать землетрясение до 9 баллов по шкале Рихтера	Конструкции способны выдержать землетрясение до 9 баллов по шкале Рихтера
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*°С)	0,14–0,17	0,048–0,17	0,004
Срок службы пролетных строений, лет	100	100	100
Стоимость материала, у.е.	1	3,1	1,5

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на вышеперечисленных фактах, можно сделать вывод, что применение пролетных строений с балками комбинированного сечения из клееной древесины и железобетона является эффективным и рациональным решением, позволяющим не только увеличить срок службы пролетного строения, снизить расход материала, но и отсрочить появление дефектов, возникающих при эксплуатации пролетного строения, выполненного из древесины.

Сама клееная древесина может не только конкурировать с традиционными строительными материалами, но и превосходить их по целому ряду свойств и параметров. В строительстве является ценным материалом с точки зрения прочности, легкости, сейсмичности и огнестойкости, отличных акустических свойств и эстетической привлекательности.

### Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

### The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

## РЕКОМЕНДАЦИЯ

Кандидат военных наук, доцент ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого» Алексеев Сергей Викторович рекомендует к публикации данный научный обзор.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванова Е.К. Клееные деревянные конструкции: опыт строительства за рубежом. М.: Госстройиздат, 1961.
2. Кулиш В.И. Клееные деревянные мосты с железобетонной плитой. М.: Транспорт, 1979.
3. Никифоров Е.П. Клееная древесина: технология изготовления, свойства, преимущества и недостатки, области применения // Современные научные исследования и инновации. 2019. № 7(99). С. 6. EDN: TVDZCD
4. Стуков В.П. Конструктивно-технологическая система и теория расчета деревожелезобетонных пролетных строений балочных автодорожных мостов. автореф. дисс. д-ра техн. наук. Архангельск, 2012. EDN: QHYAGB

5. Уткин В.А. Совершенствование конструкций пролетных строений автодорожных мостов из клееной древесины. автореф. дисс. д-ра техн. наук. Омск, 2009. EDN: NLCSGSJ
6. Иванов А.А. Технология производства, свойства, преимущества и недостатки клееной древесины // Современные научные исследования и инновации. 2021. № 6(122). С. 2. EDN: OEPPMS
7. Цуканов В.П. Исследование работы клееных деревянных балок автодорожных мостов с повышенной сдвиговой прочностью в приопорных зонах. автореф. дисс. д-ра техн. наук. Хабаровск, 2003. EDN: NHIRGD
8. Трач Е.Н., Ганненко Л.А., Кириленко В.Ф. Деревянные клееные конструкции зарубежных пешеходных мостов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2010. № 33. С. 299–303. EDN: QWXGSK
9. Волкова К.В. Современные проблемы и направления развития строительства деревожелезобетонных пролетных строений. В кн.: Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Омск, 07–08 февраля 2019 года. Омск: СибАДИ, 2019. С. 164–168. EDN: REXJPB

## REFERENCES

1. Ivanova EK. *Kleyenyye derevyannyye konstruktсии : opyt stroitelstva za rubezhom*. Moscow: Gosstroyizdat; 1961.
2. Kulish VI. *Kleyenyye derevyannyye mosty s zhelezobetonnoy plitoy*. Moscow: Transport; 1979. (In Russ.)
3. Nikiforov EP. Kleyenaya drevesina: tekhnologiya izgotovleniya. svoystva, preimushchestva i nedostatki, oblasti primeneniya. *Modern scientific researches and innovations*. 2019;7(99):6. (In Russ.) EDN: TVDZCD
4. Stukov VP. *Konstruktivno-tekhnologicheskaya sistema i teoriya rascheta derevozhelezobetonnykh proletnykh stroyeniy balochnykh avtodorozhnykh mostov [dissertation]* Arkhangelsk; 2012. (In Russ.) EDN: QHYAGB
5. Utkin VA. *Sovershenstvovaniye konstruktсий proletnykh stroyeniy avtodorozhnykh mostov iz kleyenoy drevesiny [dissertation]* Omsk; 2009. (In Russ.) EDN: NLCSGSJ
6. Ivanov AA. *Tekhnologiya proizvodstva, svoystva, preimushchestva i nedostatki kleyenoy drevesiny. Modern scientific researches and innovations*. 2021;6(122):2. (In Russ.) EDN: OEPPMS
7. Tsukanov VP. *Issledovaniye raboty kleyenykh derevyannykh balok avtodorozhnykh mostov s povyshennoy sdvigovoy prochnostyu v priopornykh zonakh [dissertation]* Khabarovsk; 2003. (In Russ.) EDN: NHIRGD
8. Trach EN, Gannenko LA, Kirilenko VF. The wooden glue structures of foreign modern pedestrian bridges. *Visnik dnipropeetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu*. 2010;33:299-303. (In Russ.) EDN: QWXGSK
9. Volkova KV. Modern problems and directions of development of construction of with wood concrete professional structures. In: *Collection of materials*

*of the III International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists "Siberian State Automobile and Highway University". 2019 Feb 7–8, Omsk, Omsk: SibADI; 2019:164-168. EDN: REXJPB*

**Сведения об авторах:**

**Лунина Алина Вячеславовна**, бакалавр, Инженерно-строительный институт;  
eLibrary SPIN: 7999-8591; ORCID: 0009-0001-8405-3024;  
E-mail: a.luni02@yandex.ru

**Кучерявая Екатерина Васильевна**, бакалавр, Инженерно-строительный институт;  
eLibrary SPIN: 7180-4449; ORCID: 0009-0003-1040-5079;  
E-mail: yekaterina.kucheryavaya.02@mail.ru

**Аверченко Глеб Александрович**, старший преподаватель, Инженерно-строительный институт;  
eLibrary SPIN: 1707-9958; ORCID: 0000-0001-8813-545X;  
E-mail: averchenko\_ga@spbstu.ru

**Information about the authors:**

**Alina V. Lunina**, bachelor, Institute of Civil Engineering;  
eLibrary SPIN: 7999-8591; ORCID: 0009-0001-8405-3024;  
E-mail: a.luni02@yandex.ru

**Ekaterina V. Kucheryavaya**, bachelor, Institute of Civil Engineering;  
eLibrary SPIN: 7180-4449; ORCID: 0009-0003-1040-5079;  
E-mail: yekaterina.kucheryavaya.02@mail.ru

**Gleb A. Averchenko**, senior lecturer, Institute of Civil Engineering  
eLibrary SPIN: 1707-9958; ORCID: 0000-0001-8813-545X;  
E-mail: averchenko\_ga@spbstu.ru

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

<https://doi.org/10.17816/transsyst627482>

© Н.А. Федосеев, С.В. Алексеев, С.М. Шевченко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
(Санкт-Петербург, Россия)

## ОБЗОР ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПОСЫЛОК К УПЛОТНЕНИЮ ГРУНТА

В настоящей статье проводится обобщение основных теоретических положений механики грунта и рассматривается формирование путей влияния свойств грунта на процесс его уплотнения. Указаны наиболее эффективные методы уплотнения грунтов в дорожном строительстве в зависимости от проявляемых ими свойств. Даны теоретические обоснования природы поведения грунта.

**Ключевые слова:** грунт; уплотнение грунта; земляное полотно; механика грунтов; свойства грунта; однородность грунта; связность грунта; влажность грунта.

### Как цитировать:

Федосеев Н.А., Алексеев С.В., Шевченко С.М. Обзор теоретических предпосылок к уплотнению грунта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 200–214. doi: 10.17816/transsyst627482

---

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© N.A. Fedoseev, S.V. Alekseev, S.M. Shevchenko

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
(St. Petersburg, Russia)

## A REVIEW OF THE THEORETICAL PRECONDITIONS FOR SOIL COMPACTION

The article aims to summarize the fundamental theoretical principles of soil mechanics and identify effective methods for influencing soil properties during the compaction process. It highlights the most effective soil compaction techniques in road construction, tailored to specific soil properties. The article also provides theoretical explanations for the behavior of different types of soil.

**Keywords:** soil; soil compaction; roadbed; soil mechanics; soil properties; soil uniformity; soil connectivity; soil moisture.

**To cite this article:**

Fedoseev NA, Alekseev SV, Shevchenko SM. A review of the theoretical preconditions for soil compaction. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(2):200–214. doi: 10.17816/transsyst627482

## ВВЕДЕНИЕ

Цель написания статьи – выделение свойств грунта, в наибольшей степени влияющих на процесс уплотнения. Кроме того, в статье дано сопоставление свойств грунта с численными характеристиками.

Рассматриваемые далее свойства относятся к нескальным (дисперсным) грунтам, как наиболее распространенным при возведении земляных сооружений. Таким образом, грунт в рамках данной работы представляет собой дисперсную среду, в которой могут присутствовать как механические, так и водно-коллоидные связи. В силу того, что строительство земляных сооружений чаще всего сопряжено с разработкой и перемещением грунта, наличие и влияние цементационных связей не учитывается. Значительное число связей данного типа нарушается в результате внешнего воздействия на грунт. Вместе с тем, в статье не рассматриваются специфические виды грунта, в том числе с выраженными цементационными связями (лессы, сильнозасоленные, шлаки и т.д.).

## СВОЙСТВА ГРУНТОВОЙ СРЕДЫ

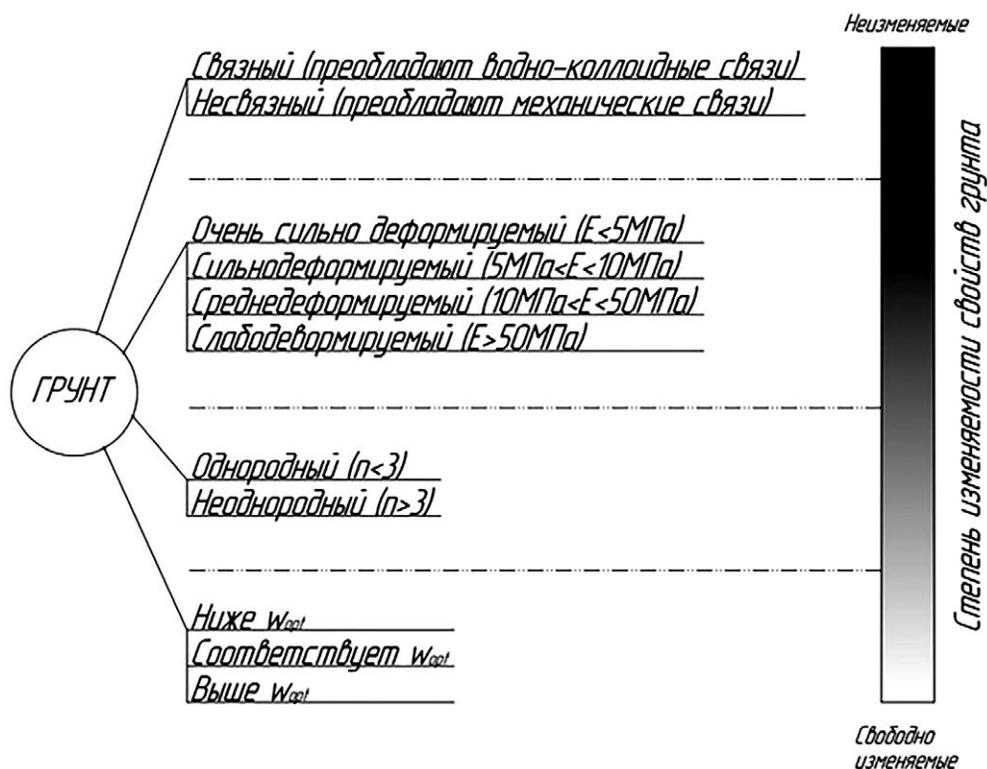
Для систематизации информации составлена схема, приведенная на Рис. 1. Вынесенные на схеме свойства грунта выбраны как наиболее значимые при уплотнении. Относительно друг друга свойства распределены с учетом их склонности к изменению – вверху схемы приведены наименее подверженные изменению, а внизу – наиболее.

При этом деление свойств среды в зависимости от их природы не производится (физические, механические и т.д.)

## СВЯЗНОСТЬ

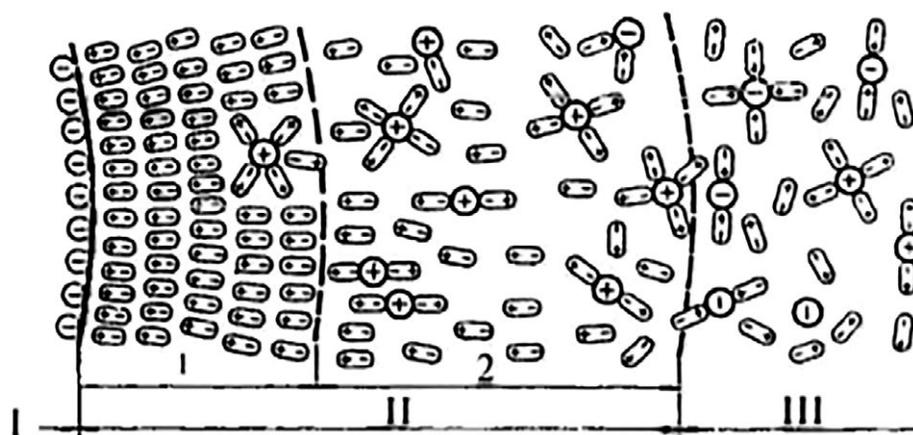
Отношение конкретного грунта к связным или несвязным зависит от гранулометрического состава. При снижении размера фракций, слагающих грунт, а также при увеличении процентного содержания мелких фракций у грунтов активнее проявляются пластические свойства. Их влияние позволяет глинистым грунтам воспринимать растягивающие напряжения (например, формировать отвесный откос или переходить в текуче-пластичное состояние при увлажнении).

Связность грунтов объясняется силами молекулярного взаимодействия между частицами грунта и воды. Частицы грунта имеют отрицательный заряд, что доказано опытами с пропусканием электрического тока через суспензию – мелкие частицы перемещаются от анода (–) к катоду (+). Молекулы воды представляют собой диполи,



**Рис. 1.** Основные свойства грунта, влияющие на процесс уплотнения с учетом их изменчивости

**Fig. 1.** The main properties of the soil affecting the compaction process, taking into account their variability



**Рис. 2.** Схема молекулярного взаимодействия частиц грунта с водой  
I – твердая частица; II – связанная вода; III – свободная вода [1]

**Fig. 2.** Scheme of molecular interaction of soil particles with water  
I – solid particle; II – bound water; III – free water [1]

несущие как положительные, так и отрицательные заряды. Таким образом, молекулы воды, расположенные в зоне влияния электромолекулярных сил частиц грунта, ориентируются к частице положительным зарядом и образуют слой связанной (пленочной) воды (Рис. 2). Этот механизм взаимодействия объясняет способность пленочной воды воспринимать касательные напряжения [1].

На количество связанной воды влияет суммарная площадь поверхности частиц грунта. Очевидно, что чем она больше, тем большая доля воды является связанной. Суммарная площадь частиц зависит от их размера и при уменьшении слагающих фракций возрастает. В результате этого песчаные и крупнообломочные грунты содержат крайне малое количество пленочной воды, не оказывающей влияния на их свойства. Глинистые грунты, наоборот, отличаются высокой долей содержания мелких фракций ( $d \leq 0,002$  мм [2]) и, как следствие, значительным количеством пленочной воды. В силу того, что связанная вода может воспринимать касательные напряжения глинистые грунты обладают пластичностью.

На основании этого численной характеристикой связанности грунтов считается число пластичности:

$$I_p = w_L - w_p, \quad (1)$$

где  $w_L$  – предел текучести;  $w_p$  – предел пластичности.

В зависимости от значения  $I_p$  грунт является песком, супесью, суглинком, глиной.

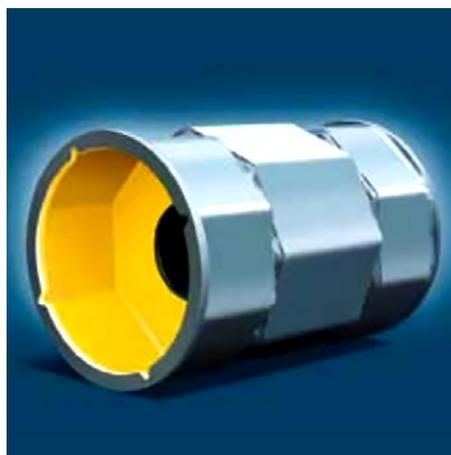
С точки зрения восприятия внешних нагрузок, в том числе и от уплотняющих механизмов, глинистые грунты (связные) значительно отличаются от песчаных. В песчаных грунтах в наибольшей степени образуются механические связи в зонах контакта частиц друг с другом. Процесс уплотнения такой среды можно представить как взаимное движение частиц по площадкам скольжения [3]. Повышение плотности происходит за счет сдвиговых деформаций кластеров частиц с их последующей переупаковкой. Кластером можно считать группу частиц, внутри которой касательные напряжения меньше предельных, а на границе – больше.

Сдвиг кластеров происходит относительно наиболее крупных пор или зёрен, которые, в данном случае, являются концентраторами напряжения. В ходе этого процесса происходит циклическое движение

кластеров (изначально сдвиг относительно друг друга, далее сближение кластеров между собой за счёт доуплотнения мелких частиц на границах кластеров) с постоянным увеличением модуля деформации среды. Движение частиц приводит к срастанию отдельных кластеров в более крупные группы [4]. Уплотнение в данном случае происходит за счёт переупаковки частиц при разрушении и перестройке их механических связей друг с другом.

Стоит отметить, что при статическом способе нагружения между частицами достаточно быстро происходит взаимозаклинивание и для продолжения эффективного уплотнения необходимо обеспечить нарушение сложившихся связей путем увеличения статической нагрузки на грунт или использованием средств уплотнения с вибрационным воздействием [5].

Уплотнение глинистых грунтов энергетически более затратно, чем – песчаных [6]. При этом при одинаковых по величине вибрационных нагрузках глубина активной толщи грунта снижается [7]. Отличительной чертой глинистых сред является высокая степень влияния пленочной воды, имеющей большую прочность на сдвиг, и малые по радиусу, по сравнению с песчаными грунтами, поры. В связи с этим, для качественного уплотнения грунта необходимы большие контактные напряжения или большая контактная площадь уплотняющего органа с грунтом [8]. Для обеспечения повышения указанных параметров применяются катки большой массы (до 30 тонн), а также катки с кулачковыми или полигональными (см. Рис. 3) вальцами.



**Рис. 3.** Пример полигонального вальца [9]

**Fig. 3.** An example of a polygonal roller [9]

## НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

В зависимости от величины максимально воспринимаемых усилий грунта принято разделять на 4 группы (см. Рис. 1). Несущая способность грунта является механическим свойством и подразумевает способность воспринимать контактные напряжения без сдвигового разрушения. На Рис. 4 отображены круги Кулона-Мора. По ним определяются два основных показателя, характеризующие прочность грунта (способность сопротивляться сдвигу) – угол внутреннего трения, зависящий от сил сцепления и трения между частицами и сцепление грунта, зависящее от сил межмолекулярного взаимодействия частиц. Песчаные грунты сцеплением не обладают.

На Рис. 4 используются следующие обозначения:  $c$  – сцепление;  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $\tau$  – касательные напряжения;  $\sigma_1$  – предельное напряжение, направленное вертикально относительно образца грунта, при котором происходят незатухающие продольные деформации («раздавливание» образца);  $\sigma_2$  – боковое давление на стенки грунтового керна, при котором при приложении вертикальной нагрузки  $\sigma_1$  происходит «раздавливание» образца.

Из Рис. 4 видно, что чем большее боковое давление испытывает грунт, тем большие касательные напряжения он может воспринимать без разрушения.

Из сказанного выше следует, что для уплотнения грунтов нагрузка от уплотняющего средства не должна превышать предела прочности грунта. Несоблюдение данного условия ведет к незатухающим боковым деформациям и, как минимум, уплотнение грунта не осуществляется,

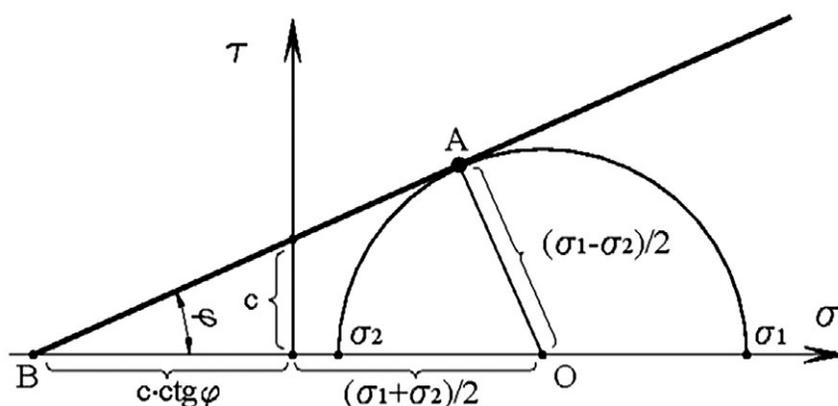


Рис. 4. Круги Кулона-Мора [10]

Fig. 4. Coulomb-Mohr circles [10]

а, как максимум, происходит его разуплотнение (примером разуплотнения может являться разрыхление верхнего слоя несвязного грунта при его уплотнении тяжелым кулачковым катком). При этом для эффективного уплотнения нагрузка от уплотняющих средств должна максимально приближаться к значениям прочности грунта.

Учитывая также, что прочность грунта зависит от бокового давления, а значит повышается в процессе уплотнения, необходимо следить за прикладываемыми усилиями, увеличивая их в ходе повышения плотности с помощью использования либо более тяжелых средств воздействия, либо путем добавления динамических нагрузок (например, вибрации).

Приведенные условия, из которых складываются прочностные показатели грунта, объясняют механизм работы песчаных свай и дренажей, применяемых на слабых и обводненных грунтах [11–13]. Сваи повышают боковое давление в прилегающем грунте, увеличивая таким образом несущую способность основания без применения укатки.

## ОДНОРОДНОСТЬ

Гранулометрический состав грунта определяет его основные свойства. Так, грунты с выраженным наличием промежуточных фракций более склонны к уплотнению в результате сдвиговых деформаций. Кластеры грунтовых частиц, сдвигаясь по площадкам наибольших касательных напряжений, закрывают поры грунта. За счет наличия различных фракций поры, образуемые крупными частицами, заполняются более мелкими [14]. В ходе подобных сдвиговых деформаций происходит переупаковка частиц грунта, а массив грунта приобретает значительную осадку. Этот процесс характеризует основной этап уплотнения грунта.

В случае с однородным грунтом происходит быстрое накопление первичных деформаций в результате сближения частиц друг с другом и роста числа их взаимных контактов (этим характеризуется предварительный этап укатки, присущий как однородным, так и неоднородным грунтам в рыхлом состоянии). В дальнейшем деформативность однородного грунта резко снижается. Такой грунт перестает давать подвижку зерен друг относительно друга за счет быстро формирующегося жесткого скелета. Размер пор между зернами в этом случае соизмерим с самими зернами. Поры остаются ничем не заполнены, так как они хоть и сопоставимы с размерами частиц, но все же меньше [15]. Сравнительные фотографии поведения под статической нагрузкой однородного и неоднородного грунтов приведены на Рис. 5.



**Рис. 5.** Гранулометрический состав:  
слева – однородный; справа – неоднородный [15]

**Fig. 5.** Granulometric composition:  
homogeneous on the left; heterogeneous on the right [15]

Но несмотря на большую жесткость при статическом нагружении однородный грунт имеет меньшую прочность на сдвиг в сравнении с неоднородным (сопротивление сдвигу и однородность грунта находятся в коррелирующей зависимости [14]). Из Рис. 5 видно, что однородный грунт имеет возможность для переупаковки частиц в результате сдвига слоев частиц в горизонтальной плоскости. Подобные деформации характерны при динамическом воздействии.

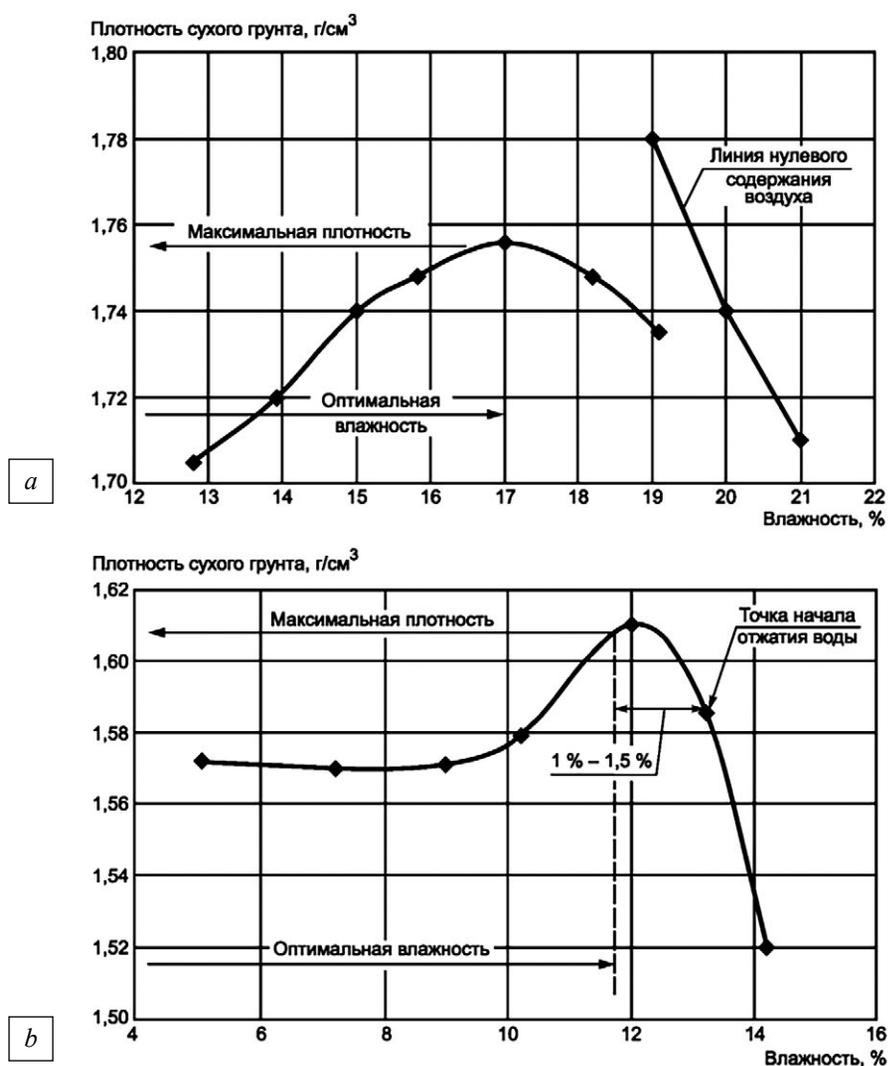
Итогом особенностей однородного грунта является продолжительная затухающая во времени осадка насыпей под воздействием вибраций от проезжающего транспорта. При этом данный грунт трудноуплотним статическими воздействиями из-за высокой жесткости структуры скелета и сильными вибрационными воздействиями из-за слабого сопротивления сдвигу (при высоких прикладываемых вибрационных усилиях однородный грунт, наоборот, разуплотняется). Эффективным подходом к уплотнению однородных грунтов является использование легких уплотняющих средств в режиме слабой вибрации [16, 17].

## ВЛАЖНОСТЬ

Влажность грунта оказывает значительное влияние на процесс уплотнения. В общем случае она может быть выше оптимальной, ниже оптимальной и равной оптимальной влажности. Понятие оптимальной влажности следует из метода определения максимальной плотности грунта, предложенного СоюздорНИИ [18, 19]. Оптимальная влажность грунта – влажность, при которой для уплотнения грунта до требуемых показателей необходимо затратить наименьшее количество работы. Способ

определения оптимальной влажности показан на Рис. 6. На пробу грунта при различных значениях влажности оказывается одинаковое силовое воздействие падающим грузом. В результате получается зависимость между влажностью грунта и его плотностью.

На Рис. 6 видно, что при первоначальном повышении влажности грунта от 0% до оптимальных значений происходит увеличение плотности. Это объясняется формированием пленочной воды, которая оказывает «смазывающий» эффект, снижения силы трения между частицами грунта [20, 21]. При дальнейшем повышении влажности плотность грунта



**Рис. 6.** Зависимость плотности грунта от влажности при стандартном уплотнении (а – для связного грунта; б – для несвязного) [19]

**Fig. 6.** Dependence of soil density on humidity with standard compaction (a – for cohesive soil; b – for non-cohesive) [19]

падает: для связных грунтов – вследствие взаимодействия пленочной воды различных частиц между собой (пленки воды отталкивают друг друга, раздвигая таким образом частицы и вызывая эффект разбухания грунта); для несвязных грунтов – вода, заполняя поры между частицами, в момент приложения нагрузки начинает воспринимать часть напряжений, разгружая таким образом скелет грунта, который испытывает меньшие напряжения и, как следствие, получает меньшее уплотнение (на Рис. 6, б данное состояние отмечено точкой начала отжатия воды).

Следует помнить, что показатели оптимальной влажности зависят от способа уплотнения пробы. Исследователи из СоюздорНИИ при разработке метода стандартного уплотнения основывались на том, что максимальные показатели плотности (коэффициент уплотнения равен 1), полученные в ходе испытания, соответствуют показателям грунта, находящегося в теле насыпи не менее 10 лет [22]. Данный метод определения максимальной плотности и, как следствие, оптимальной влажности, можно считать релевантным для всех случаев возведения насыпей, кроме верхней тонкой (0,2–0,3 м) части рабочего слоя насыпи на дорогах I категории в любых дорожно-климатических зонах и дорог любых категорий в дорожно-климатической зоне V. В указанном слое коэффициент уплотнения для защиты от процессов деформации или влагонакопления следует увеличивать до 1,0–1,05 [23, 24].

Для данного слоя характерно усиленное уплотнение, эффективность которого выше при значениях влажности немного меньшей оптимальной (оптимальная влажность определяется методом СоюздорНИИ). Однако, для проведения усиленного уплотнения необходимо использовать тяжелые уплотняющие машины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены основные свойства грунтов, оказывающие влияние на уплотнение. Дан обзор зависимости процесса уплотнения от степени проявления различных свойств. Приведены практические рекомендации.

### Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

### The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Бугров А.К. Механика грунтов: учеб. пособие. СПб.: СПбПУ, 2020.
2. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. Дата обращения: 20.02.2024. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293719/4293719820.pdf>
3. Тер-Мартirosян А.З., Анжело Г.О., Ермошина Л.Ю. и др. Влияние коэффициента неравномерности расширения грунтового образца на механические характеристики // Вестник МГСУ. 2023. № 18(10). С. 1574–1586. doi: 10.22227/1997-0935.2023.10.1574-1586
4. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Модель деформации микроструктуры песчаного грунта // Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 118 С. 853–877. EDN: VWPTMZ
5. Носов С.В. Математическое моделирование процесса уплотнения дорожно-строительных материалов жестким вальцом дорожного катка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 31–35. EDN: QCEJOT
6. Галдин Н.С. Грунтоуплотняющее оборудование на основе гидроударников // Вестник СиБАДИ. 2017. № 2(54). С.11–16. EDN: YRGNPJ
7. Костельов М.П. Возможности и эффективности виброкатков для уплотнения грунтов различного типа и состояния // Путевой навигатор. 2012. № 14(40). С. 60–71. EDN: ZQQITP
8. Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов: Теория, расчет и конструкции. Ленинград: Машиностроение, 1973.
9. Инструкция по эксплуатации грунтового катка фирмы BOMAG с полигональным вальцом. [Internet]. Дата обращения: 20.02.2024. Режим доступа: <https://specavto.ru/upload/iblock/968/968c611e2869c81fdea86a0b4757e711.pdf>.
10. Петраков А.А., Яркин В.В., Таран Р.А., Казачек Т.В. Механика грунтов: учеб. пособие. Макеевка: ДонНАСА, 2004.
11. Лямина А.А., Тетерядченко Т.Н., Деркач К.В. Укрепление слабых оснований дорожных насыпей грунтовыми текстильно-песчаными сваями. В кн.: Труды XII Международной научной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности». 30-31 декабря 2020 года; Казань. Часть 1. Казань: ООО «Конверт», 2020. – С. 172–175. EDN: VXJJDU
12. Сонин В.В. Обзор технологий усиления слабых оснований дорожных насыпей // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 5–1. С. 104–107. EDN: VZEEKF
13. Алексеев С.И., Мирошниченко Р.В. Оценка закрепления основания методом пневмотрамбования щебеночно-цементной смеси // Известия петербургского университета путей сообщения. 2007. № 4(13). С. 88–97.
14. Потапов А.Д., Платов Н.А., Лебедева М.Д. Песчаные грунты (монография). Москва: МГСУ, 2009. Дата обращения: 20.02.2024. Режим доступа: <https://elima.ru/books/?id=7030>.
15. Мирный А.Ю., Гайков Е.А., Зубов А.О. Зависимость сжимаемости несвязных грунтов от степени однородности гранулометрического состава // Вестник

- Мордовского университета. 2016. № 1(26). С. 12-19. EDN: VNUFYB  
doi: 10.15507/0236-2910.026.201601.012-019
16. Чернова Н.А., Бирюков О.Р., Ермошин Н.А. Влияние стабилизирующих добавок из целлюлозы на свойства щебеночно-мастичного асфальтобетона. В кн.: Материалы всероссийской конференции «Неделя науки ИСИ». 26–30 апреля 2021 года; СПб: СПбПУ, 2021. С. 255–257. EDN: VJVYGS
  17. Костельов М.П. Опять о качестве и эффективности уплотнения различных грунтов современными виброкатками // Дорожная техника и технологии. 2008. С.40–47. Дата обращения: 20.02.2024. Режим доступа: <https://zaovad.ru/upload/file/2017/01/25/11-dorozhnaya-tehnika-2008-1-s40-47.pdf>
  18. Федосеев Н.А., Свальбова В.А., Алексеев С.В. Автоматизированный алгоритм составления картограммы фрезерования // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9. № 2. С. 66–82. doi: 10.17816/transsyst20239266-82
  19. ГОСТ 22733-2016. Метод лабораторного определения максимальной плотности. – М.: Стандартинформ, 2019. Дата обращения: 20.02.2024. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293753/4293753343.pdf>
  20. Spoor G., Godwin R.J. Soil deformation and shear strength characteristics of some clay soils at different moisture contents // Journal of Soil Science. 1979. Vol. 30, N. 3. P. 483–498. doi: 10.1111/j.1365-2389.1979.tb01003.x
  21. Доброгорская Л.В., Лазарев Ю.Г., Федотов В.В. Применение информационного моделирования при диагностике и обследовании мостовых сооружений. В кн.: Материалы Международной научно-практической конференции «Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия». 29–30 ноября 2018 года; Комсомольск-на-Амуре. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2019. С. 223–227. EDN: UVKEFU
  22. Hu W., Jia X., Zhu X., et al. Influence of moisture content on intelligent soil compaction // Automation in Construction. 2020. Vol. 113. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103141
  23. Ермошин Н.А., Лазарев Ю.Г., Егосин А.М., Змеев А.Т. Управление инвестиционными и техническими рисками в дорожном строительстве (монография). СПб: ВА МТО, 2017.
  24. СП 34.13330.2021 Автомобильные дороги. М., 2021. Дата обращения: 20.02.2024. Режим доступа: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/119239/>

## REFERENCES

1. Bugrov AK. *Soil mechanics: schoolbook*. St. Petersburg: SPbPU; 2020. (In Russ.)
2. GOST 25100-2020 *Soils. Classification*. Moscow: Standardinform, 2020. (In Russ.) Accessed: 20.02.2024. available from: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293719/4293719820.pdf>
3. Ter-Martirosyan AZ, Anzhelo GO, Ermoshina LYu, et al. Vliyanie koefficienta neravnomernosti rasshireniya gruntovogo obrazca na mexanicheskie karakteristiki. *Vestnik MGSU*. 2023;18(10):1574–1586. (In Russ.) doi: 10.22227/1997-0935.2023.10.1574-1586
4. Lyashenko PA, Denisenko VV. Model` deformacii mikrostruktury` peschanogo grunta. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2016;(118):853-877. (In Russ.) EDN: VWPTMZ

5. Nosov SV. Matematicheskoe modelirovanie processa uplotneniya dorozhno-stroitel'ny'x materialov zhestkim val'czom dorozhnogo katka. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013;(4):31–35. (In Russ.) EDN: QCEJOT
6. Galdin NS. Gruntouplotnyayushhee oborudovanie na osnove gidroudarnikov. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017;2(54):11–16. (In Russ.) EDN: ZQQITP
7. Kostel'ov MP. Vozmozhnosti i e'ffektivnosti vibrokatkov dlya uplotneniya gruntov razlichnogo tipa i sostoyaniya. *Putevoj navigator*. 2012;14(40):60–71. (In Russ.) EDN: ZQQITP
8. Kharkhuta NYa. *Mashiny` dlya uplotneniya gruntov: Teoriya, raschet i konstrukcii*. Leningrad: Mashinostroenie; 1973. (In Russ.)
9. Instrukciya po e'kspluatacii gruntovogo katka firmy` BOMAG s poligonal'ny'm val'czom. [Internet]. [cited 2024 Feb 20]. Available from: <https://specavto.ru/upload/iblock/968/968c611e2869c81fdea86a0b4757e711.pdf>
10. Petrakov AA, Yarkin VV, Taran RA, Kazachek TV. *Soil mechanics: schoolbook*. Makeevka: DonNASA; 2004. (In Russ.)
11. Lyamina AA, Teteryadchenko TN, Derkach KV. Ukreplenie slaby'x osnovanij dorozhny'x nasy'pej gruntovy'mi tekstil'no-peschany'mi svami. In: *Proceedings of the International Scientific Conference «Prioritetny'e napravleniya innovacionnoj deyatel'nosti v promy'shlennosti». 2020 Dec 30–31; Kazan*. Kazan: Konvert; 2020:172–175. (In Russ.) EDN: VXJJDU
12. Sonin VV. Obzor tehnologij usileniya slaby'x osnovanij dorozhny'x nasy'pej. *Aktual'ny'e problemy` gumanitarny'x i estestvenny'x nauk*. 2016;(5–1):104–107. (In Russ.)
13. Alekseev SI, Miroschnichenko RV. Ocenka zakrepleniya osnovaniya metodom pnevmotrambovaniya shhebenochno-cementnoj smesi. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2007;4(13):88–97. (In Russ.)
14. Potapov AD, Platov NA, Lebedeva MD. *Peschany'e grunty`* (monograph). Moscow: MGSU; 2009. (In Russ.) [cited 2024 Feb 20]. Available from: <https://elima.ru/books/?id=7030>
15. Mirny`j AYu, Gajkov EA, Zubov AO. Non-cohesive soils' compressibility and uneven grain-size distribution relation. *Mordovia university bulletin*. 2016;1(26):12–19. (In Russ.) EDN: VNUFYB doi: 10.15507/0236-2910.026.201601.012-019
16. Chernova NA, Biryukov OR, Ermoshin NA. Vliyanie stabiliziruyushchih dobavok iz cellyulozy na svoystva shhebenochno-mastichnogo asfal'ta. In: *Materials of the All-Russian conference «Nedelya nauki ISI». 2021 Apr 26–30*. (In Russ.) EDN: VJVYGS
17. Kostel'ov MP. Opyat` o kachestve i e'ffektivnosti uplotneniya razlichny'x gruntov sovremenny'mi vibrokatkami. *Dorozhnaya texnika i tehnologii*. 2008;40–47. (In Russ.) [cited 2024 Feb 20]. Available from: <https://zaovad.ru/upload/file/2017/01/25/11-dorozhnaya-tehnika-2008-1-s40-47.pdf>
18. Fedoseev NA, Svalbova VA, Alekseev SV. Automated algorithm for drawing up a milling cartogram. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):66–82. doi: 10.17816/transsyst20239266-82

19. GOST 22733-2016 Soils. Laboratory method for determining of maximum density. Moscow: Standardinform, 2019. (In Russ.) [cited 2024 Feb 20]. Available from: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293753/4293753343.pdf>
20. Spoor G, Godwin RJ. Soil deformation and shear strength characteristics of some clay soils at different moisture contents. *Journal of Soil Science*. 1979;30(3):483–498. doi: 10.1111/j.1365-2389.1979.tb01003.x
21. Dobrogorskaya LV, Lazarev YuG, Fedotov VV. Primenenie informacionnogo modelirovaniya pri diagnostike i obsledovanii mostovy`x sooruzhenij. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Regional`ny`e aspekty` razvitiya nauki i obrazovaniya v oblasti arxitektury`, stroitel`stva, zemleustrojstva i kadastrv v nachale III ty`syacheletiya»*. 2018 Nov 29–30; Komsomolsk-on-Amur. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-na-Amure State University; 2018:223–227. (In Russ.) EDN: UVKEFU
22. Hu W, Jia X, Zhu X, et al. Influence of moisture content on intelligent soil compaction. *Automation in Construction*. 2020;113. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103141
23. Ermoshin NA, Lazarev YuG, Egoshin AM, Zmeev AT. *Upravlenie investicionny`mi i texnicheskimi riskami v dorozhnom stroitel`stve* (monograph). St. Petersburg: VA MTO; 2017. (In Russ)
24. SP 34.13330.2021 Avtomobilnye dorogi. Moscow; 2021. (In Russ.) [cited 2024 Feb 20]. Available from: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/119239/>

#### Сведения об авторах:

**Федосеев Никита Александрович**, магистрант, Инженерно-строительный институт;  
eLibrary SPIN: 6857-7057; ORCID: 0000-0001-6104-9674;  
E-mail: fedoseev.na@edu.spbstu.ru

**Алексеев Сергей Викторович**, кандидат военных наук, доцент,  
Инженерно-строительный институт;  
eLibrary SPIN: 6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;  
E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

**Шевченко Сергей Михайлович**, кандидат технических наук, доцент,  
Инженерно-строительный институт;  
eLibrary SPIN: 7734-1758; ORCID: 0000-0001-5244-8024;  
E-mail: shef10b@yandex.ru

#### Information about the authors:

**Nikita A. Fedoseev**, master's degree student;  
eLibrary SPIN: 6857-7057; ORCID: 0000-0001-6104-9674;  
E-mail: fedoseev.na@edu.spbstu.ru

**Sergey V. Alekseev**, candidate of military sciences, associate professor,  
eLibrary SPIN: 6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;  
E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

**Sergey M. Shevchenko**, candidate of technical sciences, associate professor,  
eLibrary SPIN: 7734-1758; ORCID: 0000-0001-5244-8024;  
E-mail: shef10b@yandex.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ  
Направление – Электротехнология и электрофизика

<https://doi.org/10.17816/transsyst632274>

© Д.А. Александров, И.В. Мартиросян, С.В. Покровский,  
В.В. Залеткина, И.А. Руднев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
(Москва, Россия)

## ЭНЕРГОЕМКОСТЬ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ ВТСП ЛЕНТ

**Цель.** сравнение характеристик тороидальной и соленоидальной конфигураций сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии, на основе ВТСП CORC® и рейстрек-катушек.

**Методы.** численный мультифизический анализ СПИН выполнен методом конечных элементов в среде инженерного моделирования Comsol Multiphysics.

**Результаты.** исходя из полученных результатов для реализации индуктивного накопителя энергии было выбрано использование CORC® кабеля в конфигурации соленоида с отношением плотности транспортного тока к критическому равным 0.7 при температуре кипения жидкого азота.

**Заключение.** разработанная численная модель позволяет производить расчет энергоемкости и энергетических потерь для СПИН в соленоидальной и тороидальной конфигурациях и может быть применена для разработки индуктивных накопителей на основе ВТСП композитов.

**Ключевые слова:** ВТСП композиты; СПИН; транспортные системы; метод конечных элементов.

### Как цитировать:

Александров Д.А., Мартиросян И.В., Покровский С.В., Залеткина В.В., Руднев И.А. Энергоемкость и энергетические потери индуктивного накопителя энергии на основе композитных ВТСП лент // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 215–230. doi: 10.17816/transsyst632274

## Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrotechnology and Electrophysics

© **D.A. Alexandrov, I.V. Martirosian, S.V. Pokrovskii, V.V. Zaletkina, I.A. Rudnev**National research nuclear university MEPhI  
(Moscow, Russia)**ENERGY CAPACITY AND ENERGY LOSSES  
OF INDUCTIVE ENERGY STORAGE DEVICE BASED  
ON COMPOSITE HTS TAPES**

**Aim.** The aim of this study is to compare the performance of toroidal and solenoidal configurations of a superconducting inductive energy storage device using CORC® and racetrack cables made from high-temperature superconducting tapes.

**Methods.** A numerical multiphysics analysis of inductive energy storage device was performed using the finite element method in the Comsol Multiphysics engineering modeling environment.

**Results.** The analysis revealed that the CORC® cable in a solenoid configuration, with a transport current density to critical current density ratio of 0.7 at the boiling point of liquid nitrogen, was the most suitable for inductive energy storage.

**Conclusion.** The developed numerical model allows to calculate energy capacity and energy losses in superconducting inductive energy storage devices configured as solenoids or toroids. This model can be applied to the development of inductive storage devices made from HTS composites.

**Keywords:** HTS composites; superconducting inductive energy storage device; transportation systems; finite element method.

**To cite this article:**

Alexandrov DA, Martirosian IV, Pokrovskii SV, Zaletkina VV, Rudnev IA. Energy capacity and energy losses of inductive energy storage device based on composite HTS tapes. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(2):215–230. doi: 10.17816/transsyst632274

## ВВЕДЕНИЕ

Использование возобновляемых источников электроэнергии в последнее время вызывает интерес во всем мире [1, 2]. Однако, из-за прерывистого характера энергопроизводства большинства существующих возобновляемых источников энергии, таких как ветряные генераторы и солнечные батареи, накопители энергии являются важным компонентом любой устойчивой и надежной электросистемы. Наиболее широко исследованные системы накопления энергии включают в себя кинетические накопители энергии, индуктивные накопители энергии, гидроаккумулирующие системы, и суперконденсаторы [3, 4]. Они используются для обеспечения стабильности электросетей, благодаря их высокой способности к передаче и накоплению энергии [5–7]. Одними из перспективных устройств для накопления электроэнергии являются индуктивные накопители энергии на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [8].

Устройство СПИН представляет собой комбинацию трех технологий, а именно сверхпроводимости, криогеники и силовой электроники. Сверхпроводящая катушка – сердце СПИН. Электрически это чистый индуктор (без внутреннего сопротивления), и постоянный ток может течь через него без каких-либо омических потерь [9]. В результате сверхпроводящая катушка может сохранять ток или энергию в течение многих лет с плотностью энергии до 100 МДж/м<sup>3</sup>.

Накопленная энергия передается в электросеть в режиме разрядки. Индуктивные накопители способны быстро срабатывать и могут переходить из режима зарядки в режим разрядки за времена порядка нескольких микросекунд. Дополнительными преимуществами таких систем являются отсутствие движущихся компонентов и высокая циклическая эффективность [10]. Наиболее распространенными конструкциями катушек СПИН являются соленоид и тороид. При изготовлении катушек индуктивных ВТСП накопителей энергии используются такие технологии как CORC® кабель и рейстрек-катушки [11, 12].

Чтобы провод оставался в сверхпроводящем состоянии, ВТСП элементы индуктивного накопителя энергии всегда должны поддерживаться при температурах, плотностях тока и магнитном поле ниже критических значений. Для достижения и поддержания рабочей температуры используется криокулерная техника, а также жидкие хладагенты, такие как жидкий азот, гелий, неон и водород [13]. Критический ток в сверхпроводнике и, как следствие, энергоемкость

СПИН зависят от температуры. Целью представленной работы является выбор оптимальной конфигурации индуктивного накопителя энергии, а также исследование зависимости максимально возможной накопленной энергии и потерь СПИН от температуры.

## ТЕОРИЯ Н-ФОРМАЛИЗМА

Построение и расчет модели проводились в программной среде COMSOL Multiphysics®. В модели решается управляющее уравнение Фарадея методом конечных элементов:

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times E + \frac{d(\mu_0 H)}{dt} = 0 \quad (1)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля,  $B$  – индукция магнитного поля,  $H$  – напряженность магнитного поля,  $\mu_0$  – магнитная постоянная. Вольт-амперная характеристика сверхпроводника задается в виде степенного закона для нелинейной зависимости сопротивления от тока:

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left( \frac{|J|}{J_c} \right)^n, \quad (2)$$

где  $E_c$  – критерий, принятый равным 1 мкВ/см,  $J_c$  – критическая плотность тока,  $n$  – показатель степени, характеризующий крутизну ВАХ сверхпроводника. Для корректного расчета в выражение (2) вводится зависимость критической плотности тока от величины приложенного магнитного поля  $J_c(B)$ . Компоненты тока  $J=[J_x, J_y, J_z]$  вычисляются с помощью уравнений Максвелла:

$$J = \nabla \times H = \begin{cases} \frac{dH_z}{dy} - \frac{dH_y}{dz} \\ -\frac{dH_z}{dx} + \frac{dH_x}{dz} \\ \frac{dH_y}{dx} - \frac{dH_x}{dy} \end{cases} \quad (3)$$

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВТСП

Тепловые процессы в ВТСП описываются управляющим уравнением теплопередачи, в котором температура  $T$  является зависимой переменной:

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k(T)\nabla T) = Q + \rho(T)C_p(T)w\nabla T, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность,  $k$  – коэффициент теплопроводности,  $Q$  – все источники тепла,  $C_p$  – теплоемкость при постоянном давлении,  $w$  – поле скорости температур. Термоэлектрический локальный источник тепла  $Q$  определяется выражением:

$$Q = \|E\| \cdot \|J\|, \quad (5)$$

где  $E$  и  $J$  определяются из уравнений (1)–(3). В выражении (2) в присутствии магнитного поля зависимость плотности критического тока  $J_c$  от температуры  $T$  и индукции магнитного поля  $B$  в ВТСП описывается экспериментальной интерполированной критической поверхностью, изображенной на Рис. 1 [14].

В рамках данной работы рассматривались два способа охлаждения: охлаждение жидким хладагентом (жидким азотом) и охлаждение посредством теплопроводности твердого тела. В последнем случае

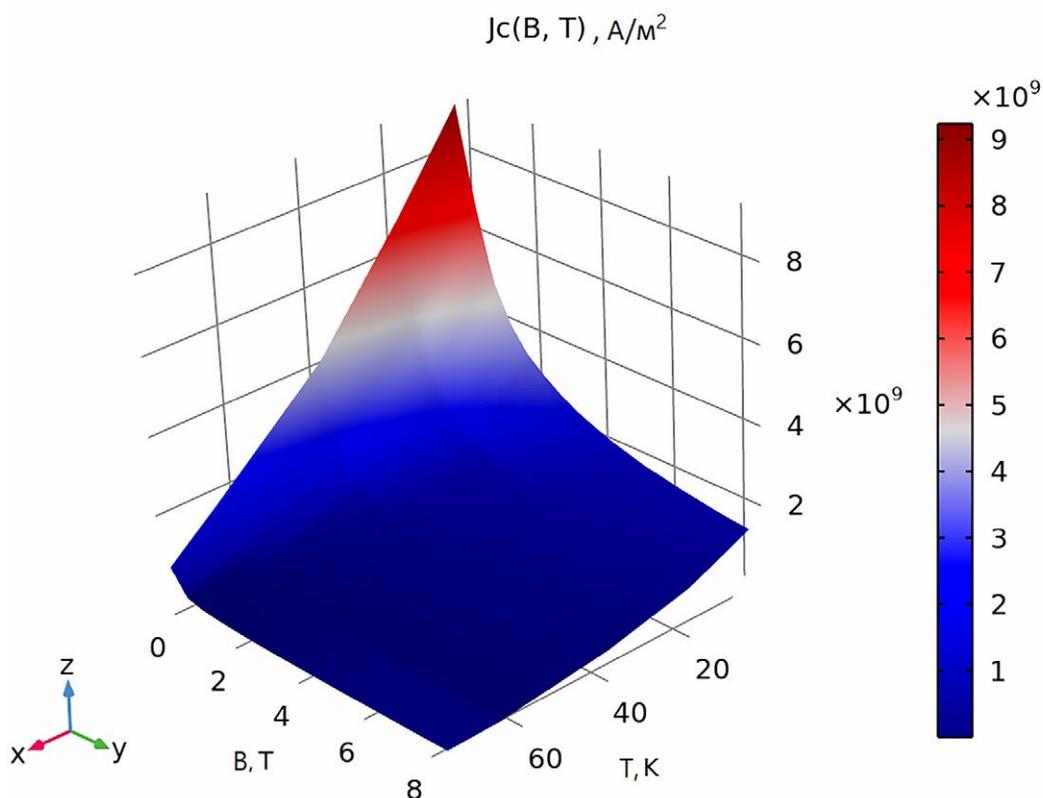


Рис. 1. Экспериментальная критическая поверхность  $J_c(B, T)$

Fig. 1. Experimental critical surface  $J_c(B, T)$

мощность теплоотвода и температура холодного пальца соответствует параметрам реальной криокулерной установки.

В случае охлаждения жидким азотом учитывались два режима кипения хладагента: пузырьковое кипение и конвективное кипение. Коэффициент теплоотдачи для конвективного кипения определяется следующим выражением:

$$\alpha_{conv} = C_{conv} \Delta T^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

где  $C_{conv}$  – коэффициент, определяемый размером образца,  $\Delta T$  – разность температур на границе между ВТСП композитом и жидким азотом [15]. Для пузырькового кипения коэффициент теплоотдачи задается следующим образом:

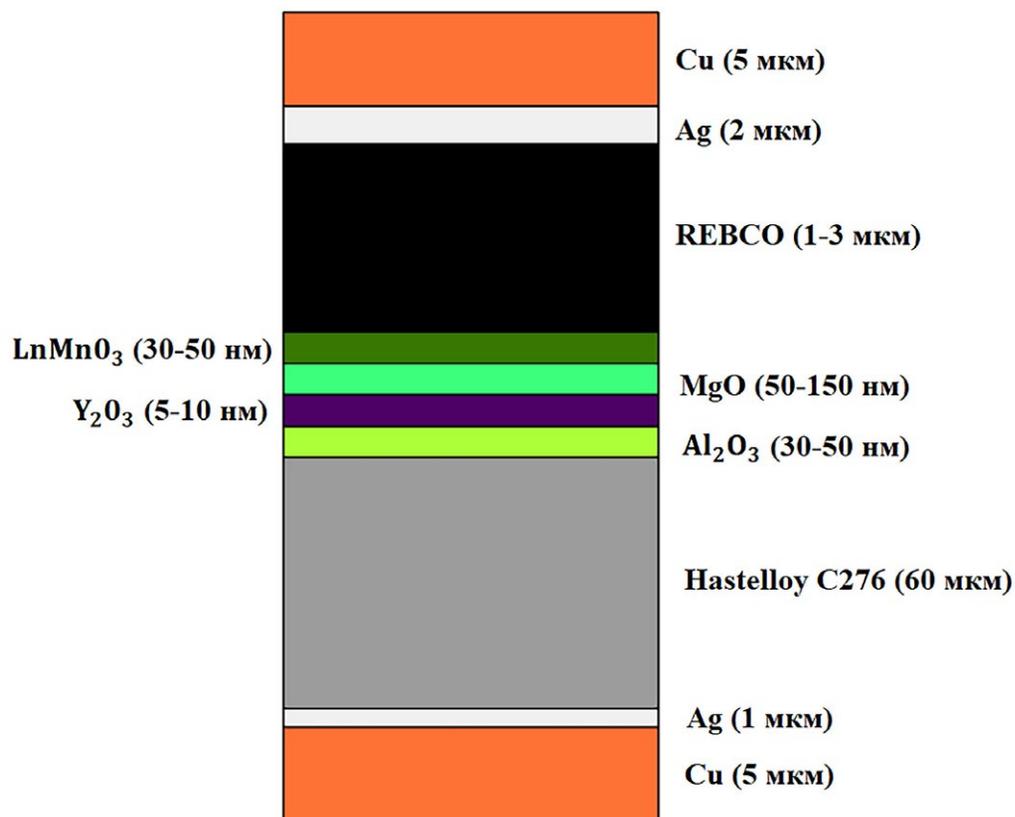
$$\alpha_{boil} = C_h q^{0.624} (\rho C_p k)^{0.117}, \quad (7)$$

где  $C_h$  – коэффициент, зависящий от материала поверхности ВТСП композита (в нашем случае медь) и параметров жидкого хладагента,  $C_p$  – теплоемкость,  $k$  – теплопроводность жидкого азота,  $\rho$  – плотность,  $q$  – тепловой поток. Выбор того или иного коэффициента теплоотдачи определяется, используя гистерезисную зависимость теплового потока  $q$  от разности температур [15].

## ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ

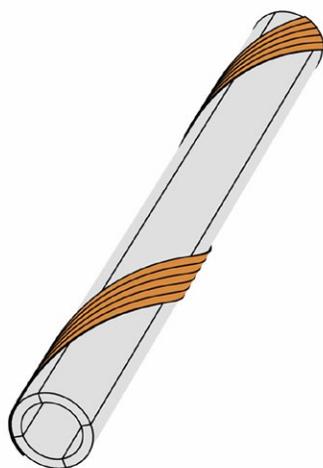
Для создания замкнутых элементов в форме рейстрек и CORC® кабеля использовались композитные ВТСП-ленты REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> 2G фирмы SuperOx. На Рис. 2 приведена архитектура ВТСП-ленты. Такие ленты обладают высокими токонесущими характеристиками: критический ток ) в собственном поле при температуре кипения жидкого азота (77 К составляет 550 А. Толщина сверхпроводящего слоя составляет 1–3 мкм.

На Рис. 3 представлена принципиальная схема CORC® кабеля. Конструкция каждого провода соответствует одной и той же базовой архитектуре: сверхпроводящие ленты наматываются спиральными слоями вокруг цилиндрического сердечника из мельхиорового сплава. На Рис. 4 представлена принципиальная схема рейстрек-катушки, в которой ВТСП ленты наматываются на формер послойно.



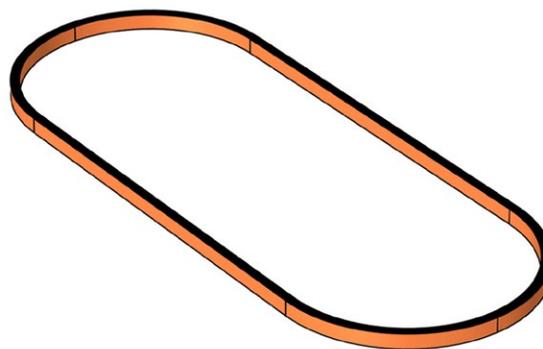
**Рис. 2.** Архитектура ВТСП-ленты SuperOx

**Fig. 2.** Architecture of HTSC tape SuperOx



**Рис. 3.** Принципиальная схема CORC® кабеля

**Fig. 3.** Cable schematic diagram CORC®



**Рис. 4.** Принципиальная схема рейстрек-катушки

**Fig. 4.** Schematic diagram of a racetrack coil

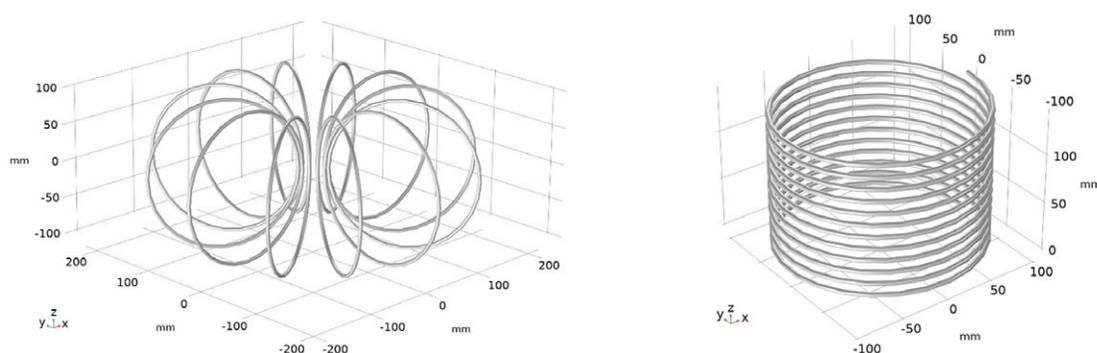
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Сравнение характеристик тороидальной и соленоидальной конфигураций

Чтобы сконструировать магнит СПИН, необходимо получить следующие предварительные данные: количество энергии, запасенной в катушке, рабочий ток, рабочая температура, методы охлаждения и максимально доступная длина сверхпроводящей ленты, необходимая для намотки ВТСП катушки.

При конструировании СПИН, наибольшее распространение получили соленоидальные и тороидальные конструкции сверхпроводящего магнита. Обычно сегментированное тороидальное расположение является предпочтительным с точки зрения технического обслуживания и проектирования, поэтому винтовая конфигурация тороида в рамках представленной работы не рассматривается. Для реализации прототипа индуктивного ВТСП накопителя энергии рассматриваются тороидальная конструкция СПИН, состоящая из 12 секций, а также соленоидальная конструкция, состоящая из 12 витков ВТСП провода (см. Рис. 5).

В обоих случаях сверхпроводящие катушки обладают следующими параметрами: диаметр провода – 5 мм, радиус кольца – 100 мм, рабочий ток – 5 кА. Длина ВТСП кабеля, необходимого для намотки: 7.34 м – для тороидальной конфигурации, 7.43 м – для соленоидальной конфигурации.



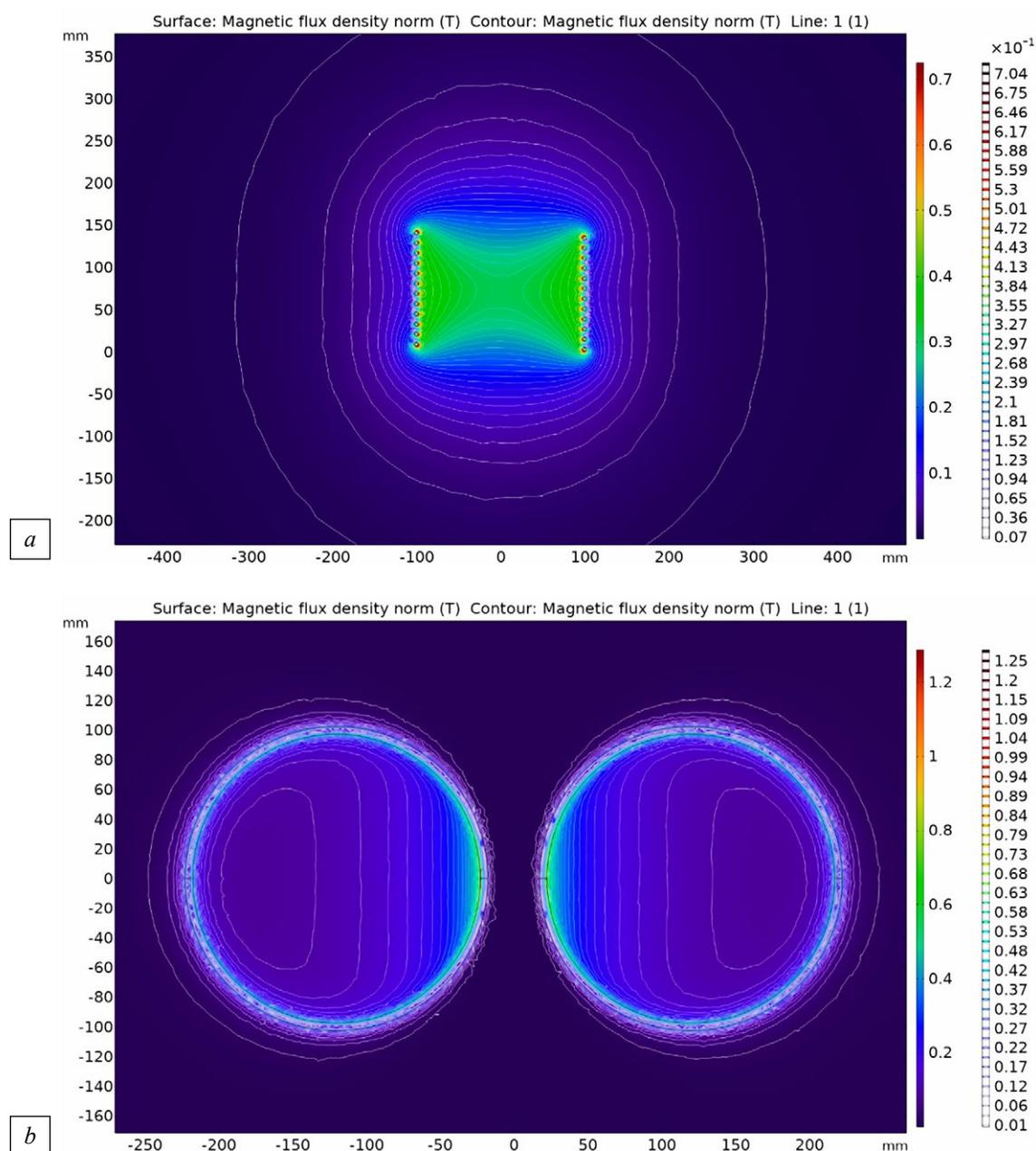
**Рис. 5.** Геометрия анализируемых конфигураций.

Слева – СПИН с тороидальной геометрией;  
Справа – СПИН с соленоидальной геометрией

**Fig. 5.** Geometry of analyzed configurations.

Left: SPIN with toroidal geometry;  
Right – SPIN with solenoidal geometry

На Рис. 6 и 7 представлены распределения величины индукции магнитного поля и линии магнитного поля в центральном сечении для обеих конструкций. Количество уровней для магнитных линий в обоих случаях одинаково. Охлаждение здесь производилось жидким азотом при температуре кипения 77 К.



**Рис. 6.** Норма индукции магнитного поля и магнитные линии: а – в соленоидальном СПИН; б – в тороидальном СПИН при рабочем токе 5кА

**Fig. 6.** Magnetic field induction rate and magnetic lines: a – in solenoidal SPIN; b – in toroidal SPIN at an operating current of 5 kA

Анализ Рис. 6 и 7 показал, что для соленоида рассеянное магнитное поле значительно больше, чем для тора (линии уровней в 1 случае отстоят от границы сверхпроводника максимум на 200 мм, а во 2 случае на 50 мм). Максимальное поле больше в торе почти на 60%. При этом максимум индукции магнитного поля в обеих конфигурациях приходится на сами ВТСП обмотки. Указанное обстоятельство может привести к ухудшению критических характеристик сверхпроводящей ленты в соответствии с Рис. 1 и к дополнительным потерям, при этом чем выше напряженность магнитного поля на обмотках ВТСП кабеля, тем выше будут гистерезисные потери. При разработке СПИН необходимо использовать высокополевую ВТСП ленту, способную сохранять критические характеристики в сильных магнитных полях.

На основе разработанных численных моделей был проведен расчет энергоемкости, механических напряжения и индуктивности тороидальной и соленоидальной конфигураций катушек СПИН. В Табл. 1 представлены основные расчетные характеристики индуктивных ВТСП накопителей энергии. Для секционной тороидальной конфигурации энергоемкость практически в 2 раза меньше, чем в соленоидальной конфигурации. Такая значительная разница в этом показателе объясняется более высокими гистерезисными потерями в случае использования тороида.

**Таблица.** Расчетные характеристики

**Table.** Design characteristics

	Тороид	Соленоид
Энергоемкость, Дж	157	301
Растягивающая нагрузка, кПа	221	198
Индуктивность, Гн	0,3	0,8

Полученные результаты позволяют заключить, что конфигурация соленоидной катушки СПИН выбирается для малого и среднего масштаба, поскольку она подвержена более низким механическим напряжениям и имеет большую энергоемкость. Для крупномасштабных СПИН критически важным является показатель рассеянного магнитного поля, поэтому для реализации такого устройства, несмотря на более высокие механические нагрузки, тороидальная конструкция катушки предпочтительнее в сравнении с соленоидом. Кроме того, разница в полной длине ВТСП ленты, использованной в этих конфигурациях оказывается

значительной только на крупномасштабных системах, где тороидальная конфигурация оказывается более экономически выгодной [16]. В нашем случае длина сверхпроводящей ленты отличается незначительно. Таким образом, для реализации маломасштабного прототипа спин выбирается соленоидальная конфигурация ВТСП катушки, и дальнейшие расчеты энергоемкости и потерь в системе выполняются для нее.

### Сравнение потерь в CORC® кабеле и рейстрек кабеле

Для ВТСП CORC® кабеля и рейстрек катушек в соленоидальной конфигурации ВТСП накопителя был проведен расчет общих потерь при температуре кипения жидкого азота. Результаты расчетов представлены на Рис. 7.

Видно, что при малых плотностях тока ( $J/J_c < 0,5$ ) потери для обеих конфигураций катушек слабо отличаются (менее чем на 10%). При более высоких токах крутизна зависимости потерь от плотности тока увеличивается и CORC® кабель становится значительно более выгодным.

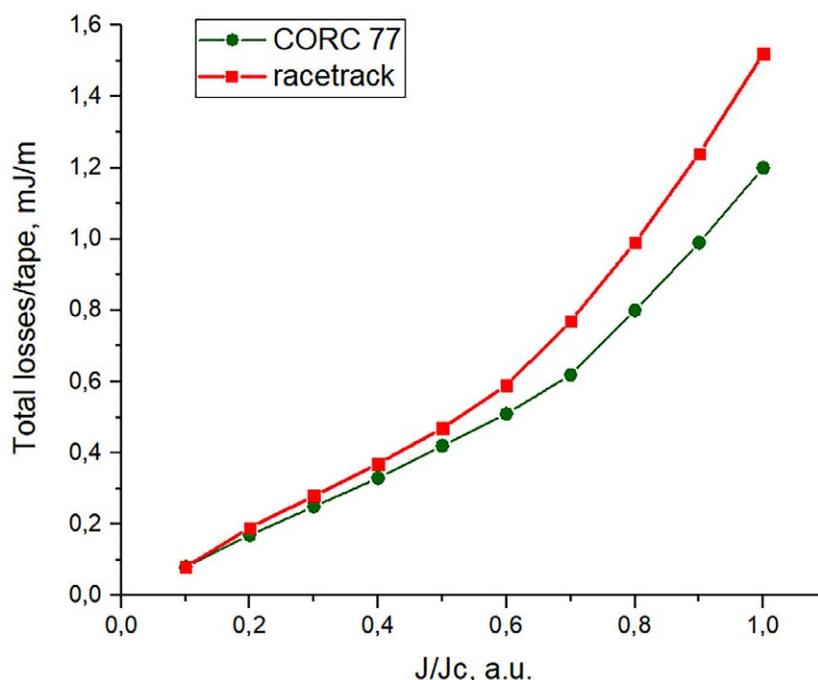


Рис. 7. Полные потери в рейстрек и CORC® кабеле в зависимости от плотности тока при 77 К

Fig. 7. Total loss in racetrack and CORC® cable as a function of current density at 77 K

Этот факт объясняется тем, что рейстрек кабель из-за своей слоистости греется изнутри, что приводит к большим потерям. Более того, в случае рейстрек кабеля рост потерь усиливается начиная с  $J/J_c = 0,6$ , а у CORC® кабелей с 0,7.

Исходя из вышеизложенного можно сделать следующий вывод: для реализации прототипа индуктивного ВТСП накопителя энергии оптимальным является выбор CORC® кабеля в конфигурации соленоида. Оптимальное отношение  $J/J_c$  при охлаждении жидким азотом составляет 0,7.

На Рис. 8 представлены результаты расчетов потерь для случая CORC® кабеля в соленоидальной геометрии при различных температурах. Как и ожидалось, потери снижаются уменьшением температуры. При этом следует отметить, что для 77 К при  $J/J_c > 0,5$  параметры теплоотвода жидким азотом ухудшаются и криокулер в данном случае лучше подходит для охлаждения. Однако, в то же самое время, криокулер тратит запасенную в СПИН энергию на охлаждение. Учет этой связи станет предметом последующих исследований.

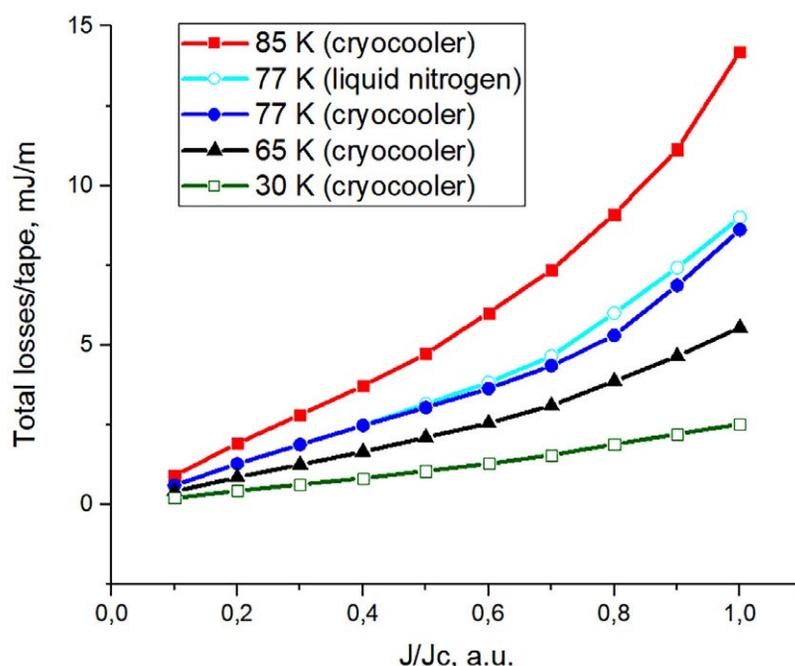


Рис. 8. Полные потери в CORC® кабеле в зависимости от плотности тока при различных температурах

Fig. 8. Total loss in a CORC® cable as a function of current density at different temperatures

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе метода конечных элементов разработана численная модель индуктивного ВТСП накопителя энергии в тороидальной и соленоидальной геометрии. Рассмотрены случаи конструирования ВТСП обмоток на основе рейстрек катушек и CORC кабеля. Проведена сравнительная оценка характеристик тороидальной и соленоидальной конфигураций СПИН с использованием CORC® и рейстрек кабелей, в результате которой, была выбрана оптимальная с точки зрения минимизации потерь соленоидальная конструкция маломасштабного индуктивного накопителя с проводом из CORC® кабеля. В случае охлаждения жидким азотом для выбранной конфигурации было получено оптимальное, с точки зрения энергоэффективности, отношение плотности тока к плотности критического тока, равное 0.7. Проведены расчеты потерь в геометрии соленоида, охлаждаемого при помощи криокулерной установки, при различных температурах.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

### Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

### The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Adetokun B.B., Muriithi C.M., Ojo J.O. Voltage stability analysis and improvement of power system with increased SCIG-based wind system integration // IEEE PES/IAS PowerAfrica. 2020. Vol. 2020. P. 1–5. doi: 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219803
2. Adetokun B.B., Ojo J.O., Muriithi C.M. Reactive power-voltage-based voltage instability sensitivity indices for power grid with increasing renewable energy penetration // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 85401–85410. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2992194
3. Amiryar M.E., Pullen K.R. A review of flywheel energy storage system technologies and their applications // Applied Sciences. 2017. Vol. 7, N. 2. P. 286. doi: 10.3390/app7030286

4. Saikia B.K. A brief review on supercapacitor energy storage devices and utilization of natural carbon resources as their electrode materials // *Fuel*. 2020. Vol. 282. P. 118796. doi: 10.1016/j.fuel.2020.118796
5. Connolly D. The technical and economic implications of integrating fluctuating renewable energy using energy storage // *Renewable energy*. 2012. Vol. 43. P. 47–60.
6. Wang J.S., Zeng Y., Huang H., et al. The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world // *Physica C*. 2002. Vol. 378–381, N. 1. P. 809–814. doi: 10.1016/S0921-4534(02)01548-4
7. Song M. 100 kJ/50 kW HTS SMES for micro-grid // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2014. Vol. 25, N. 3. P. 1–6. doi: 10.1109/TASC.2014.2386345
8. Mukherjee P., Rao V.V. Design and development of high temperature superconducting magnetic energy storage for power applications-A review // *Physica C: Superconductivity and its applications*. 2019. Vol. 563. P. 67–73. doi: 10.1016/j.physc.2019.05.001
9. Ali M.H., Wu B., Dougal R.A. An overview of SMES applications in power and energy systems // *IEEE transactions on sustainable energy*. 2010. Vol. 1, N. 1. P. 38–47. doi: 10.1109/TSTE.2010.2044901
10. Adetokun B.B., Oghorada O., Abubakar S.J. Superconducting magnetic energy storage systems: Prospects and challenges for renewable energy applications // *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 55. P. 105663. doi: 10.1109/TSTE.2010.2044901
11. Yagotintsev K., Anvar V.A., Gao P., et al. AC loss and contact resistance in REBCO CORC®, Roebel, and stacked tape cables // *Superconductor science and technology*. 2020. Vol. 33, N. 8. P. 085009. doi: 10.1088/1361-6668/ab97ff
12. Cardozo N.J.L., ten Kate H.J.J., Dudarev M.A. Development of the First ReBCO-CORC Based Racetrack Model Coil. [Student thesis: Master] Eindhoven, 2018.
13. Yeom H.K. Study of cryogenic conduction cooling systems for an HTS SMES // *IEEE transactions on applied superconductivity*. 2007. Vol. 17, N. 2. P. 1955–1958. doi: 10.1109/TASC.2007.898491
14. Molodyk A. Development and large volume production of extremely high current density YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> superconducting wires for fusion // *Scientific reports*. 2021. Vol. 11, N. 1. P. 2084. doi: 10.1038/s41598-021-81559-z
15. Zubko V.V. Heat transfer simulation to liquid nitrogen from HTS tapes at the overload currents. *Physics Procedia*. 2015;67:619–624. doi: 10.1016/j.phpro.2015.06.105
16. Saichi Y., Miyagi D., Tsuda M.A. Suitable design method of SMES coil for reducing superconducting wire usage considering maximum magnetic flux density // *IEEE transactions on applied superconductivity*. 2013. Vol. 24, N. 3. P. 1–5. doi: 10.1109/TASC.2013.2290279

## REFERENCES

1. Adetokun BB, Muriithi CM, Ojo JO. Voltage stability analysis and improvement of power system with increased SCIG-based wind system integration. *IEEE PES/IAS PowerAfrica*. 2020;2020:1–5. doi: 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219803

2. Adetokun BB, Ojo JO, Muriithi CM. Reactive power-voltage-based voltage instability sensitivity indices for power grid with increasing renewable energy penetration. *IEEE Access*. 2020;8:85401–85410. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2992194
3. Amiryar ME, Pullen KR. A review of flywheel energy storage system technologies and their applications. *Applied Sciences*. 2017;7(2):286. doi: 10.3390/app7030286
4. Saikia BK. A brief review on supercapacitor energy storage devices and utilization of natural carbon resources as their electrode materials. *Fuel*. 2020;282:118796. doi: 10.1016/j.fuel.2020.118796
5. Connolly D. The technical and economic implications of integrating fluctuating renewable energy using energy storage. *Renewable energy*. 2012;43:47–60.
6. Wang JS, Zeng Y, Huang H, et al. The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world. *Physica C*. 2002;378–381(1):809–814. doi: 10.1016/S0921-4534(02)01548-4
7. Song M. 100 kJ/50 kW HTS SMES for micro-grid. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2014;25(3):1–6. doi: 10.1109/TASC.2014.2386345
8. Mukherjee P, Rao VV. Design and development of high temperature superconducting magnetic energy storage for power applications-A review. *Physica C: Superconductivity and its applications*. 2019;563:67–73. doi: 10.1016/j.physc.2019.05.001
9. Ali MH, Wu B, Dougal RA. An overview of SMES applications in power and energy systems. *IEEE transactions on sustainable energy*. 2010;1(1):38–47. doi: 10.1109/TSTE.2010.2044901
10. Adetokun BB, Oghorada O, Abubakar SJ. Superconducting magnetic energy storage systems: Prospects and challenges for renewable energy applications. *Journal of Energy Storage*. 2022;55:105663. doi: 10.1109/TSTE.2010.2044901
11. Yagotintsev K, Anvar VA, Gao P, et al. AC loss and contact resistance in REBCO CORC®, Roebel, and stacked tape cables. *Superconductor science and technology*. 2020;33(8):085009. doi: 10.1088/1361-6668/ab97ff
12. Cardozo NJL, ten Kate HJJ, Dudarev MA. Development of the First ReBCO-CORC Based Racetrack Model Coil. [Student thesis: Master] Eindhoven, 2018.
13. Yeom HK. Study of cryogenic conduction cooling systems for an HTS SMES. *IEEE transactions on applied superconductivity*. 2007;17(2):1955–1958. doi: 10.1109/TASC.2007.898491
14. Molodyk A. Development and large volume production of extremely high current density YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> superconducting wires for fusion. *Scientific reports*. 2021;11(1):2084. doi: 10.1038/s41598-021-81559-z
15. Zubko VV. Heat transfer simulation to liquid nitrogen from HTS tapes at the overload currents. *Physics Procedia*. 2015;67:619–624. doi: 10.1016/j.phpro.2015.06.105
16. Saichi Y, Miyagi D, Tsuda MA. Suitable design method of SMES coil for reducing superconducting wire usage considering maximum magnetic flux density. *IEEE transactions on applied superconductivity*. 2013;24(3):1–5. doi: 10.1109/TASC.2013.2290279

**Сведения об авторах:**

**Александров Дмитрий Александрович**, инженер-исследователь;

eLibrary SPIN: 5365-6190; ORCID: 0009-0001-7383-0094;

E-mail: cfrfcfrfdima123@gmail.com

**Мартirosян Ирина Валерьевна**, кандидат физико-математических наук; инженер-исследователь;

eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;

E-mail: mephizic@gmail.com

**Покровский Сергей Владимирович**, кандидат физико-математических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией;

eLibrary SPIN: 6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

**Залеткина Виктория Витальевна**, инженер-исследователь;

ORCID: 0009-0009-9854-5028

E-mail: viktoriazalеткина@gmail.com

**Руднев Игорь Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник;

eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;

E-mail: iarudnev@mephi.ru

**Information about the authors:**

**Dmitry A. Alexandrov**, research engineer;

eLibrary SPIN: 5365-6190; ORCID: 0009-0001-7383-0094;

E-mail: cfrfcfrfdima123@gmail.com

**Irina V. Martirosian**, PhD in Physics and Mathematics, PhD, research engineer;

eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;

E-mail: mephizic@gmail.com

**Sergey V. Pokrovskii**, PhD in Physics and Mathematics, Head of the Laboratory;

eLibrary SPIN: 6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

**Victoria V. Zaletkina**, research engineer;

ORCID: 0009-0009-9854-5028

E-mail: viktoriazalеткина@gmail.com

**Igor A. Rudnev**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Lead Research Fellow;

eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;

E-mail: iarudnev@mephi.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ  
Направление – Электротехнология и электрофизика

<https://doi.org/10.17816/transsyst628299>

© А.В. Саушев, И.В. Белоусов, Е.В. Бова, А.Ю. Румянцев  
Государственный университет морского и речного флота  
имени адмирала С.О. Макарова  
(Санкт-Петербург, Россия)

## НЕПОЛНОФАЗНЫЕ АЛГОРИТМЫ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ ТРЕХФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

**Цель.** Анализ неполнофазных алгоритмов широтно-импульсной модуляции трехфазных напряжений при частотном управлении электроприводами по критерию числа коммутаций ключей преобразователя частоты.

**Материалы и методы.** Для исследования процессов широтно-импульсной модуляции при частотном управлении электроприводами использованы методы теории электрических цепей. Предложенные алгоритмы иллюстрируются рисунками и могут быть реализованы в программной среде матричной лаборатории.

**Результаты.** Рассмотрен процесс широтно-импульсной модуляции в системах частотного управления электроприводами. Установлено, что для минимизации числа коммутаций ключей преобразователя частоты целесообразно применение неполнофазных алгоритмов широтно-импульсной модуляции. Проанализированы возможные функции предмодуляции, включая алгоритмы широтно-импульсной модуляции с равномерным и неравномерным распределением потерь энергии в ключах. Получены аналитические модели функций предмодуляции для алгоритмов широтно-импульсной модуляции с включением нижних ключей полумостов преобразователя, а также с чередованием включения их верхних и нижних ключей.

**Заключение.** Результаты могут быть использованы при разработке алгоритмов управления преобразователями частоты в системах асинхронного электропривода.

**Ключевые слова:** широтно-импульсная модуляция; неполнофазные алгоритмы; преобразователь частоты; электропривод.

### Как цитировать:

Саушев А.В., Белоусов И.В., Бова Е.В., Румянцев А.Ю. Неполнофазные алгоритмы широтно-импульсной модуляции трехфазных напряжений в системах частотного управления электроприводами // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 231–246. doi: 10.17816/transsyst628299

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

© **A.V. Saushev, I.V. Belousov, E.V. Bova, A.Yu. Rumyantsev**  
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
(St. Petersburg, Russia)

## INCOMPLETE-PHASE ALGORITHMS FOR PULSE- WIDTH MODULATION OF THREE-PHASE VOLTAGES IN FREQUENCY CONTROL SYSTEMS OF ELECTRIC DRIVES

**Aim.** This study aims to analyze incomplete-phase algorithms for pulse-width modulation of three-phase voltages in the frequency control of electric drives, focusing on the criterion of minimizing the number of switching keys in the frequency converter.

**Materials and methods.** To study processes pulse-width modulation processes the in frequency control of electric drives, methods of the theory of electric circuits were used. The proposed algorithms are illustrated in figures and can be implemented in MATLAB software environment.

**Results.** The study examines the pulse-width modulation process in frequency control systems for electric drives. It was established that using incomplete-phase pulse-width modulation algorithms is advisable to minimize the number of switching keys in the frequency converter. Various premodulation functions were analyzed, including pulse-width modulation algorithms with uniform and uneven energy loss distribution across the keys. Analytical models of premodulation functions for pulse-width modulation algorithms were developed, incorporating the use of lower keys in the converter half-bridges and alternating inclusion of their upper and lower keys.

**Conclusion.** The results can be applied to the development of algorithms for controlling frequency converters in asynchronous electric drive systems.

**Keywords:** pulse width modulation; incomplete phase algorithms; frequency converter; electric drive.

### To cite this article:

Saushev AV, Belousov IV, Bova EV, Rumyantsev AYu. Incomplete-phase algorithms of pulse-width modulation of three-phase voltages in frequency control systems of electric drives. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(2):231–246. doi: 10.17816/transsyst628299

## ВВЕДЕНИЕ

Системы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) находят широкое применение в различных областях техники и, в частности, при управлении электродвигателями в составе автоматизированного электропривода. На транспорте, в настоящее время, основное применение находит асинхронный электропривод, для управления которым наиболее широко используются системы частотного и векторного управления. Важнейшей задачей ШИМ напряжения, формируемого электронно-ключевым преобразователем в системе преобразователь – электродвигатель, является снижение пульсаций тока на периоде модуляции [1–5]. При этом под ШИМ понимается процесс аппроксимации импульсами синусоидального напряжения, которое необходимо для управления электродвигателями.

Мера расхождения между желаемым напряжением и его импульсной аппроксимацией является важнейшей характеристикой качества модуляции. Чем меньше это расхождение, тем выше качество модуляции. Показатели качества ШИМ существенно зависят от частоты следования импульсов. При этом, с одной стороны, увеличение частоты модуляции позволяет более точно формировать напряжение на выходе преобразователя частоты, приблизив его к синусоидальной функции, а, с другой стороны, ведет к возрастанию динамических потерь в электронных ключах этого преобразователя, который является важнейшим силовым элементом электропривода. Таким образом, повышение качества модуляции лишь за счет повышения частоты модуляции не дает желаемого эффекта и приводит к дополнительным потерям. Вместе с тем известно, что повышение качества модуляции напряжения на нагрузке объективно ведет к снижению потерь мощности и уменьшению виброшумовых характеристик электроприводов. Отсюда следует важность решения задач, направленных на повышение качества модуляции в системе электропривода.

В настоящее время известно достаточно большое количество методов, реализующих ШИМ, для сравнения которых используются различные критерии – качества модулированного напряжения [6, 7] и тока [8, 9], коэффициент гармоник [6, 10], потери мощности в электродвигателе [11].

В работе [12] установлено, что основным критерием, определяющим качество модуляции, по которому следует сравнивать алгоритмы ШИМ, является дисперсия тока в нагрузке. Можно показать, что при фиксированной частоте модуляции неполнофазные алгоритмы ШИМ (Н-ШИМ) будут уступать по критерию дисперсии тока в нагрузке оптимальным полнофазным алгоритмам ШИМ (П-ШИМ) [12].

Важнейшим показателем качества ШИМ является также число коммутаций ключей преобразователя частоты. Это обусловлено тем, что уменьшение числа коммутаций ключей на периоде модулирующей функции ведет к снижению динамических потерь энергии в электронных ключах. Если положить, что потери энергии в трехфазном электронно-ключевом мосте ограничены способностью рассеивания их без нарушения работоспособности моста, то при заданных динамических потерях энергии можно поднять частоту модуляции и поднять ее качество. Это особенно актуально для мощных преобразователей частоты.

В работах [3–16] показано, что для минимизации числа коммутаций ключей преобразователя частоты целесообразно применение неполнофазных алгоритмов ШИМ. На основе алгоритмов с минимальным числом коммутаций ключей преобразователя актуальны также алгоритмы ШИМ с равномерным распределением потерь энергии в ключах. Очевидно, что при наличии датчиков температуры ключей у мощных электронных преобразователей энергии можно синтезировать алгоритмы, которые будут автоматически следить за равномерным распределением потерь энергии в ключах. Работы в этом направлении уже ведутся [17]. Рассмотрим возможные алгоритмы неполнофазной трехфазной ШИМ.

## АЛГОРИТМЫ НЕПОЛНОФАЗНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ШИМ

Как известно, широтно-импульсная модуляция трехфазного напряжения реализуется на трех электронно-ключевых полумостах преобразователя частоты (см. Рис. 1).

Полумосты трехфазного электронно-ключевого моста далее обозначаются  $A$ ,  $B$ ,  $C$ . Управление полумостами осуществляется так,

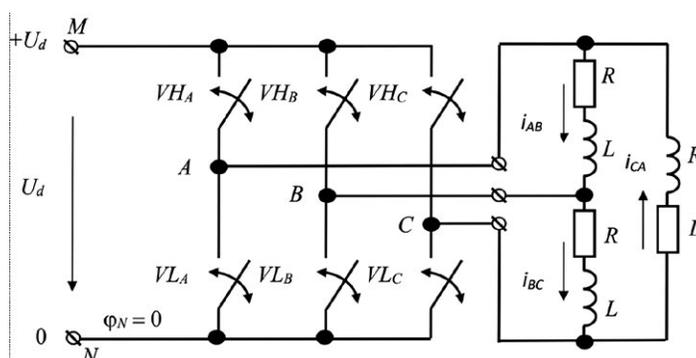


Рис. 1. Иллюстрация широтно-импульсной модуляции напряжения

Fig. 1. Illustration of pulse-width voltage modulation

что включен либо верхний, либо нижний ключ. Следовательно, для описания управления полумостами  $X = A, B, C$  достаточно задать, коммутационные импульсные функции верхних ключей [12].

Пусть заданы модулирующие функции фазных напряжений  $g_A = u_A/U_d$ ;  $g_B = u_B/U_d$ ;  $g_C = u_C/U_d$ , где  $u_A, u_B, u_C$  – фазные напряжения на нагрузке;  $U_d$  – напряжение источника питания. Будем полагать, что они удовлетворяют следующему соотношению

$$g_A + g_B + g_C = 0 \quad (1)$$

Модулирующие функции линейных напряжений  $g_{AB} = u_{AB}/U_d$ ;  $g_{BC} = u_{BC}/U_d$ ;  $g_{CA} = u_{CA}/U_d$  связаны с модулирующими функциями фазных напряжений и модулирующими функциями потенциалов полумостов соотношениями, которые следуют из второго закона Кирхгофа для трехфазного моста (см. Рис. 1):

$$\begin{aligned} g_{AB} &= g_A - g_B = \gamma_A - \gamma_B \\ g_{BC} &= g_B - g_C = \gamma_B - \gamma_C \\ g_{CA} &= g_C - g_A = \gamma_C - \gamma_A \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\gamma_X$  – скважность импульса в полумосте  $X = A, B, C$ .

Решение уравнений (2) относительно модулирующих функций потенциалов полумостов  $X = A, B, C$  можно записать в следующем виде:

$$\gamma_X = g_X + \gamma_0 = 1/2 + g_X - g_0, \quad (3)$$

где  $\gamma_0$  – нулевая потенциальная функция, являющаяся свободной переменной;  $g_0 = 1/2 - \gamma_0$  – переменная, называемая функцией предмодуляции.

Нулевая потенциальная функция линейно связана с модулирующими функциями ключей следующим выражением

$$\gamma_0 = \frac{\gamma_A + \gamma_B + \gamma_C}{3}. \quad (4)$$

Многообразие алгоритмов модуляции определяется выбором функции предмодуляции. Заметим, что модулирующие функции ключей полумостов  $X = A, B, C$  имеют линейную связь. Следовательно, одна из трех модулирующих функций ключей может быть выбрана произвольно. В настоящей статье связи модулирующих функции полумостов выберем так, чтобы минимизировать число коммутаций ключей.

Для формального описания алгоритма будем полагать, что заданы модулирующие функции фазных напряжений  $g_A, g_B, g_C$ . Упорядочим эти функции в порядке убывания. Возможны шесть комбинаций неравенств:

$$\begin{aligned} g_A > g_B > g_C; g_B > g_A > g_C; g_B > g_C > g_A; \\ g_C > g_B > g_A; g_C > g_A > g_B; g_A > g_C > g_B. \end{aligned} \quad (5)$$

Неравенства (5) разобьем на три группы:

группа 1:  $g_A > g_B > g_C; g_A > g_C > g_B;$

группа 2:  $g_B > g_A > g_C; g_B > g_C > g_A;$

группа 3:  $g_C > g_B > g_A; g_C > g_A > g_B.$

Положим, что имеет место первая группа неравенств, в которой наибольшая модулирующая функция напряжения  $g_A$ . Есствэто так, то будем полагать, что коммутационная функция полумоста  $\chi_A=1$  (включен верхний ключ полумоста  $A$ ). Тогда модулирующая функция полумоста  $A$ , на основании выражения (3) будет иметь вид:

$$\gamma_A = 1/2 + g_A - g_0 = 1$$

Из данного выражения следует, что функция предмодуляции

$$g_0 = g_A - 1/2.$$

Полученная функция предмодуляции определяет модулирующие функции других двух полумостов:

$$\gamma_B = 1 + g_B - g_A = 1 - g_{AB}; \gamma_C = 1 + g_C - g_A = 1 - g_{AC}.$$

Очевидно, что при выполнении первой группы неравенств, модулирующие функции линейных напряжений  $g_{AB}=g_A-g_C; g_{AC}=g_A-g_C$  будут удовлетворять неравенствам  $0 \leq g_{AB}, g_{AC} \leq 1$ .

Таким образом, на одной третьей периода можно без коммутаций ключей полумоста  $A$  обеспечить модуляцию линейных и фазных напряжений. Аналогично, если выполняются равенства второй и третьей группы, то будут включены верхние ключи полумостов  $B$  и  $C$ .

В общем виде функция предмодуляции для всех трех интервалов времени на периоде модулирующих функций фазных напряжений запишется в следующем виде:

$$g_0^H = \max\{g_A, g_B, g_C\} - 1/2. \quad (6)$$

Тогда модулирующие функции ключей (3) полумостов  $X = A, B, C$  будут определяться выражением

$$\gamma_X = 1 + g_X - g_0^H.$$

Графики модулирующих функций потенциалов полумоста  $\gamma_A$  и нулевой потенциальной функции  $\gamma_0^H = 1/2 - g_0^H$  с функцией предмодуляции  $g_0^H$  приведены на Рис. 2 а. Число коммутаций ключей полумостов за период модулирующих функций фазных и линейных напряжений  $N = 2 \times f^* + 3$ , где  $f^*$  – относительная частота модуляции.

### АЛГОРИТМ ШИМ С ВКЛЮЧЕНИЕМ НИЖНИХ КЛЮЧЕЙ ПОЛУМОСТОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Неравенства (5) разобьем на следующие три группы:

группа 1:  $g_C > g_B > g_A$ ;  $g_B > g_C > g_A$ ;

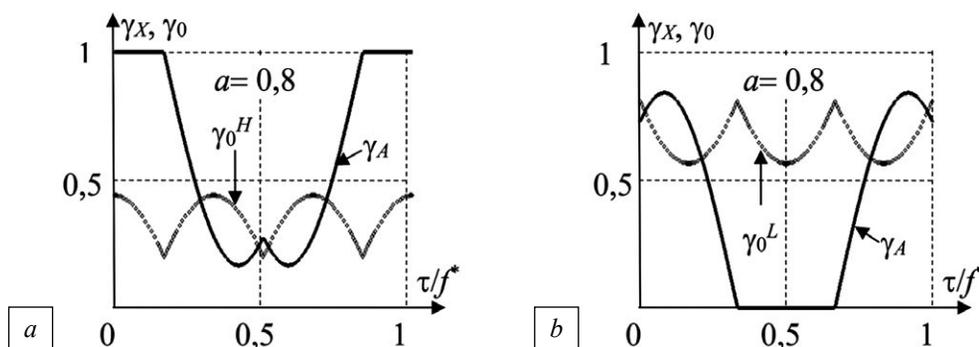
группа 2:  $g_A > g_C > g_B$ ;  $g_C > g_A > g_B$ ;

группа 3:  $g_A > g_B > g_C$ ;  $g_B > g_A > g_C$ .

Положим, что имеет место первая группа неравенств. Можно принять, что модулирующая функция полумоста  $A$  (3):

$$\gamma_A = 1/2 + g_A - g_0 = 0.$$

Значению  $\gamma_A = 0$  соответствует значение коммутационной функции полумоста  $\chi_A = 0$  (включен нижний ключ полумоста  $A$ ). Тогда функция предмодуляции будет иметь вид:  $g_0 = g_A + 1/2$ .



**Рис. 2.** Графики модулирующих функций потенциалов полумоста  $\gamma_A$  и нулевой потенциальной функции  $\gamma_0$  с функцией предмодуляции: а)  $g_0^H$ ; б)  $g_0^L$

**Fig. 2.** Graphs of the modulating functions of the half-bridge potentials  $\gamma_A$  and the zero potential function  $\gamma_0$  with the premodulation function: а)  $g_0^H$ ; б)  $g_0^L$

Данное равенство определяет остальные модулирующие функции других двух полумостов:  $\gamma_B = g_B - g_A = g_{BA}$ ;  $\gamma_C = g_C - g_A = g_{CA}$ .

Очевидно, что при выполнении первой группы неравенств, модулирующие функции линейных напряжений  $g_{BA} = g_B - g_A$ ;  $g_{CA} = g_C - g_A$  будут удовлетворять неравенствам  $0 \leq g_{BA}$ ,  $g_{CA} \leq 1$ . Таким образом, на одной третьей периода можно без коммутаций ключей полумоста  $A$  обеспечить модуляцию линейных и фазных напряжений. Аналогично, если выполняются равенства второй и третьей группы, то будут включены верхние ключи полумостов  $B$  и  $C$ .

В общем виде функция предмодуляции для всех трех интервалов времени на периоде модулирующих функций фазных напряжений запишется в следующем виде:

$$g_0^L = \min\{g_A, g_B, g_C\} + \frac{1}{2}. \quad (7)$$

Тогда модулирующие функции ключей (3) полумостов  $X = A, B, C$  будут определяться выражением:  $\gamma_X = g_X - g_0^L$ .

Графики модулирующих функций потенциалов полумоста  $\gamma_A$  и нулевой потенциальной функции  $\gamma_0^H = 1/2 - g_0^H$  с функцией предмодуляции  $g_0^H$  приведены на Рис. 2 б. Число коммутаций ключей полумостов за период модулирующих функций фазных и линейных напряжений можно вычислить по формуле

$$N = 2 \times f^* + 3,$$

где  $f^*$  – относительная частота модуляции.

## АЛГОРИТМ ШИМ С ЧЕРЕДОВАНИЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ВЕРХНИХ И НИЖНИХ КЛЮЧЕЙ ПОЛУМОСТОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Если применять один из рассмотренных выше алгоритмов, то верхние или, соответственно, нижние ключи будут иметь большие статические потери мощности. Для равномерного нагрева ключей целесообразно чередовать алгоритмы с включением нижних и верхних ключей.

Для формального описания алгоритма будем полагать, что заданы модулирующие функции фазных напряжений  $g_A(\tau)$ ,  $g_B(\tau)$ ,  $g_C(\tau)$ . С помощью данных функций синтезируем булеву переменную  $x_0$ , определяющую чередование включенного состояния верхних и нижних ключей мостовой схемы (см. Рис. 1).

В результате получим следующее выражение:

$$x_0(\beta) = 1(-g_A(\tau - \beta) \cdot g_B(\tau - \beta) \cdot g_C(\tau - \beta)), \quad (8)$$

где  $\tau$  – относительное время;  $\beta$  – параметр сдвига булевой функции;  $f^*$  – относительная частота модуляции.

Булева переменная  $x_0(\beta)$  будет периодической функцией времени, частота которой в три раза выше частоты модулирующих функций напряжения. Вариация параметра сдвига в интервале  $\beta \in [-f^*/12, f^*/12]$ , исчерпывает все возможные варианты трехфазной модуляции с минимальным числом коммутаций ключей. График булевой переменной  $x_0$ , определяющей чередование включенного состояния верхних и нижних ключей приведен на Рис. 3.

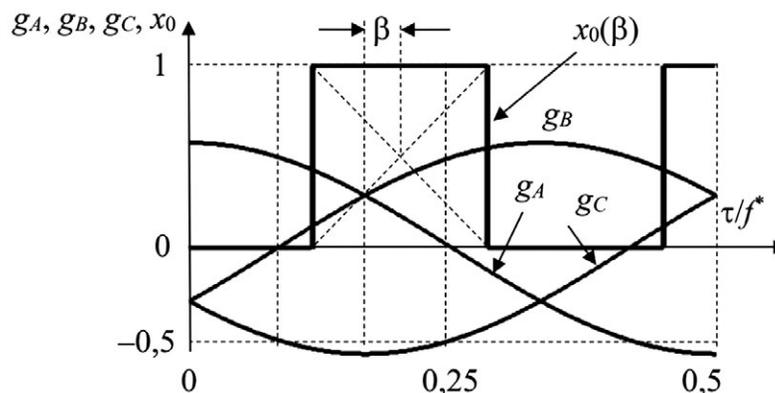
Используя функцию  $x_0(\beta)$ , запишем функцию предмодуляции

$$g_0(\beta) = \left( \begin{array}{l} 1/2 - x_0(\beta) + x_0(\beta) \cdot \max\{g_A, g_B, g_C\} + \\ + (1 - x_0(\beta)) \cdot \min\{g_A, g_B, g_C\} \end{array} \right). \quad (9)$$

Модулирующие функции ключей запишутся в виде

$$\gamma_X = 1/2 + g_X - g_0(\beta). \quad (10)$$

Выбор  $\beta$  функции предмодуляции  $g_0(\beta)$  определяет алгоритм модуляции и его качество. Графики модулирующих функций ключей полумостов и их функция предмодуляции  $g_0(0)$ , обеспечивающая минимальное число коммутаций ключей при синусоидальных



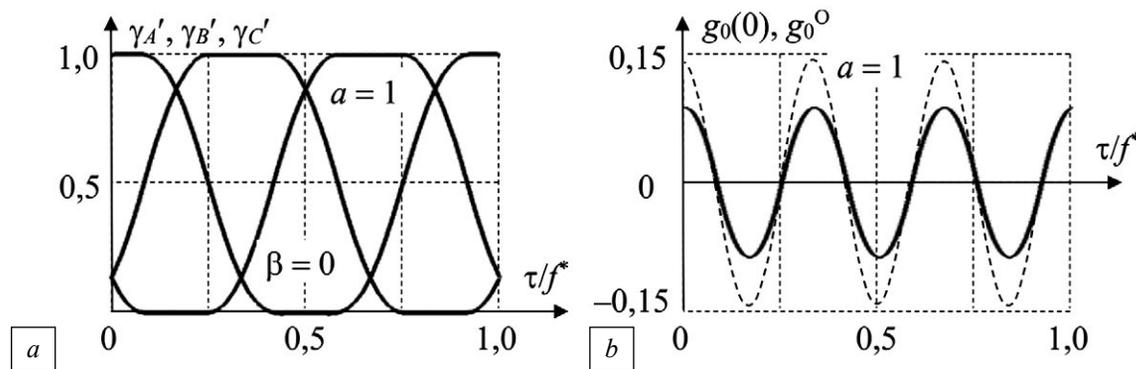
**Рис. 3.** График булевой переменной  $x_0(\beta)$ , определяющей чередование включенного состояния верхних и нижних ключей

**Fig. 3.** Graph of the Boolean variable  $x_0(\beta)$ , which determines the alternation of the enabled state of the upper and lower keys

модулирующих функциях фазных напряжений, приведены на Рис. 4. На Рис. 4 б пунктиром показана оптимальная функция предмодуляции  $g_0^0$  по рассматриваемому критерию.

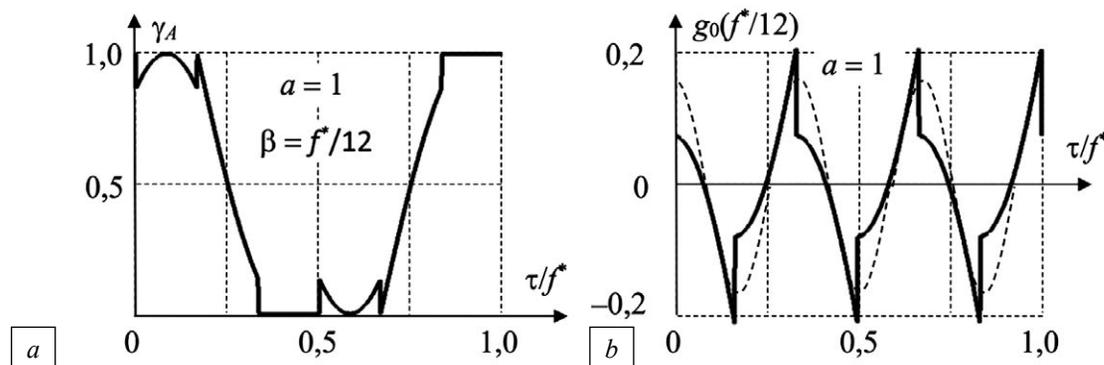
Графики модулирующих функций ключей полумостов и их функция предмодуляции  $g_0(\beta)=g_0(f^*/12)$ , обеспечивающая минимальное число коммутаций ключей при синусоидальных модулирующих функциях фазных напряжений приведены на Рис. 5. На Рис. 5 б пунктиром показана оптимальная по критерию минимума дисперсии токов функция предмодуляции  $g_0$ , определенная выражением [12]

$$g_0 = g_0^0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{g_A \cdot g_B \cdot g_C}{g_A^2 + g_B^2 + g_C^2}. \quad (11)$$



**Рис. 4.** Графики: а) модулирующих функции ключей полумостов и б) их функция предмодуляции  $g_0(0)$ , обеспечивающая минимальное число коммутаций ключей

**Fig. 4.** Graphs: a) the modulating functions of the half-bridge keys and b) their premodulation function  $g_0(0)$ , which provides the minimum number of key switches



**Рис. 5.** Графики: а) модулирующей функции ключей полумоста  $A$  и б) функции предмодуляции  $g_0(f^*/12)$ , обеспечивающая минимальное число коммутаций ключей

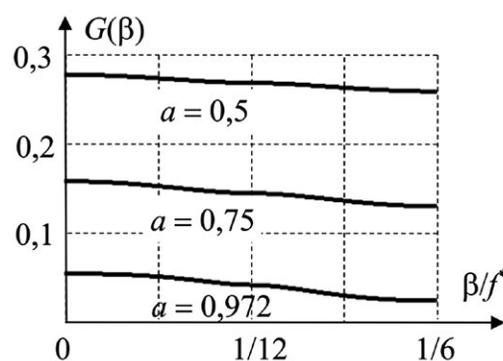
**Fig. 5.** Graphs: a) the modulating function of the half-bridge keys  $A$  and b) the premodulation function  $g_0(f^*/12)$ , which provides the minimum number of key switches

Логично предположить, что наиболее предпочтительной по критерию дисперсии тока функцией предмодуляции будет такая функция, которая имеет минимальные отклонения от оптимальной функции предмодуляции, определенной выражением (11). В качестве меры отличия функций предмодуляции  $g_0^0$  и  $g_0(\beta)$  при  $\beta=f^*/12$  может быть использован интегральный квадратичный функционал на периоде функции предмодуляции:

$$G(\beta) = \sqrt{\frac{6}{f^*} \int_0^{f^*/6} (1 - g_0(\beta) / g_0^0)^2 \cdot d\tau}.$$

График зависимости  $G(\beta)$  при синусоидальных модулирующих функциях фазных напряжения приведен на Рис. 6. Из представленных графиков следует, что наибольшее и наименьшее среднеквадратичное отклонение функции предмодуляции  $g_0(\beta)$  от оптимальной функции предмодуляции  $g_0^0$  достигается при  $g_0^{HL0} = g_0(0)$  и  $g_0^{HL1} = g_0(f^*/12)$ . Следовательно, наименьшую дисперсию тока неполнофазная ШИМ будет обеспечивать при использовании функции предмодуляции  $g_0^{HL1}$  при  $\beta = f^*/12$ . При уменьшении коэффициента амплитуды модуляции  $a$  величина  $G(\beta)$  возрастает.

Число коммутаций ключей полумостов за период модулирующих функций фазных и линейных напряжений  $N = 2 \times f^* +$ , где  $f^*$  – относительная частота модуляции. Заметим, что чередование включения верхних и нижних ключей полумостов приводит к некоторому повышению числа коммутаций ключей.



**Рис. 6.** График зависимости  $G(\beta)$  при синусоидальных модулирующих функциях фазных напряжений

**Fig. 6.** Graph of the dependence of  $G(\beta)$  for sinusoidal modulating functions of phase voltages

Коммутационные функции ключей полумостов  $X = A, B, C$ , позволяющие реализовать алгоритм Н-ШИМ с равномерным распределением потерь энергии на электронных ключах, запишутся в следующем виде:

$$\chi_X = 1 \left( \phi - \frac{1 - \gamma_X}{2} + \Delta\alpha_X \right) \cdot 1 \left( \frac{1 + \gamma_X}{2} + \Delta\alpha_X - \phi \right),$$

где  $\gamma_X$  – модулирующая потенциальная функция полумоста, определенная выражением(10);  $\Delta\alpha_X$  – коэффициент смещения импульса относительно середины интервала ШИМ [12]  $\phi = \phi(\tau)$  – пилообразная функция времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация рассмотренного алгоритма Н-ШИМ на практике приведет к увеличению дисперсии тока, которая является основным критерием качества модуляции. Однако, с другой стороны, минимизация числа коммутаций ведет к снижению динамических потерь энергии в ключах, что позволит увеличить частоту модуляции и уменьшить дисперсию тока. Таким образом, дальнейшим направлением исследований является сравнение алгоритмов модуляции Н-ШИМ и П-ШИМ по величине дисперсии тока при заданных потерях энергии в ключах. Такое сравнение может быть выполнено по величине интегральной дисперсии тока.

**Авторы заявляют, что:**

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

**The authors state that:**

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Madhavi R., Narinath C. Investigation of various space vector pwm techniques for inverter // International Journal of Engineering Research and Management (IJERM). 2014. Vol. 1, N. 7. P. 162–165. Дата обращения: 09.03.2024. Режим доступа: [https://www.ijerm.com/download\\_data/IJERM0110071.pdf](https://www.ijerm.com/download_data/IJERM0110071.pdf)
2. Климов В. Частотно-энергетические параметры шим-инверторов систем бесперебойного питания // Силовая электроника. 2009. № 22. С. 66–71. Дата обращения: 09.03.2024. Режим доступа: [https://power-e.ru/wp-content/uploads/2009\\_4\\_66.pdf](https://power-e.ru/wp-content/uploads/2009_4_66.pdf)

3. Hava A.M., Çetin N.O. A Generalized Scalar PWM Approach with Easy Implementation Features for Three-Phase, Three-Wire Voltage-Source Inverters // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010. Vol. 26, N. 5. P.1385–1395. doi: 10.1109/TPEL.2010.2081689
4. Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Лихоманов А.М., Розов А.Ю. Трехфазная синусоидальная модифицированная широтно-импульсная модуляция первого рода в автономных инверторах // *Морской вестник*. 2017. Т. 61, № 1. С. 69–72. Дата обращения: 09.03.2024. Режим доступа: [http://morvest.ru/Full%20articles/MV-61\\_to%20Web.pdf](http://morvest.ru/Full%20articles/MV-61_to%20Web.pdf)
5. Mao X., Аyyanar R., Krishnamurthy H.K. Optimal variable switching frequency scheme for reducing switching loss in single-phase inverters based on time-domain ripple analysis // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009. Vol. 24, N. 4. P. 991–1001. doi: 10.1109/TPEL.2008.2009635
6. Булатов О.Г., Олещук В.И. Автономные тиристорные инверторы с улучшенной формой выходного напряжения. Кишинев: Штиинца, 1980.
7. Гуськов В.О., Лавин А.В. Сравнительный анализ математических описаний и методов широтно-импульсной модуляции // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. 2023. № 3. С. 74–81. doi: 10.24143/2073-1574-2023-3-74-81
8. Hava A.M., Kerkman R.J., Lipo T.A. A High Performance Generalized Discontinuous PWM Algorithm // *IEEE Transactions on Industry applications*. 1998. Vol. 34, N. 5. P. 1059–1071. doi: 10.1109/28.720446
9. Орлов Ю.И., Петренко Ю.Н. Поискový алгоритм оптимизации выходного напряжения инвертора // *Техническая электродинамика*. 1986. № 4. С. 50–57.
10. Tan G., Deng Q., Liu Z. An optimized SVPWM strategy for five-level active NPC (5L-ANPC) converter // *IEEE Transactions on power electronics*. 2013. Vol. 29, N. 1. P. 386–395. doi: 10.1109/TPEL.2013.2248172
11. Томасов В.С., Усольцев А.А., Вертегел Д.А., Денисов К.М. Исследование пульсаций электромагнитного момента в прецизионном сервоприводе при синусоидальной широтно-импульсной модуляции // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2019. Т. 19, № 2. С. 359–368. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-359-368
12. Belousov I.V., Samoseyko V.F., Saushev A.V. Assessment of filtering properties of asynchronous electric drive with pulse width modulation // *E3S Web of Conferences*. 2022. Vol. 363. P. 1–8. doi: 10.1051/e3sconf/202236301025
13. Hava A.M., Çetin N.O. A Generalized Scalar PWM Approach with Easy Implementation Features for Three-Phase, Three-Wire Voltage-Source Inverters // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2011. Vol. 26, N. 5. P. 1385–1395. doi: 10.1109/TPEL.2010.2081689
14. Баховцев И.А., Зиновьев Г.С. Обобщенный анализ выходной энергии многофазных многоуровневых инверторов напряжения с широтно-импульсной модуляцией // *Электричество*. 2016. № 4. С. 26–33. EDN: WALPQZ
15. Чаплыгин Е.Е., Хухтиков С.В. Широтно-импульсная модуляция с пассивной фазой в трехфазных инверторах напряжения // *Электричество*. 2011. № 5. С. 53–61. EDN: NRBWQP

16. Nayeemuddin M., Rao C. Space Vector Based High Performance Discontinuous Pulse Width Modulation Algorithms for VSI Fed AC Drive // *Innovative Systems Design and Engineering (IJSR)*. 2016. Vol. 5, N. 7. P. 203–208. Дата обращения: 09.03.2024. Режим доступа: <https://www.ijer.net/archive/v5i7/NOV164785.pdf>
17. Анучин А.С., Гуляева М.А., Шпак Д.М., и др. Минимизация и перераспределение коммутационных потерь в инверторе напряжения при использовании алгоритма широтно-импульсной модуляции с прогнозированием // *Вестник МЭИ*. 2019. № 1. С. 79–85. doi: 10.24160/1993-6982-2019-1-79-85

## REFERENCES

1. Madhavi R, Harinath C. Investigation of various space vector pwm techniques for inverter. *International Journal of Engineering Research and Management (IJERM)*. 2014;1(7):162–165. [cited: 09.03.2023] Available from: [https://www.ijerm.com/download\\_data/IJERM0110071.pdf](https://www.ijerm.com/download_data/IJERM0110071.pdf)
2. Klimov V. Chastotno-energeticheskie parametry shim-invertorov sistem bespereboynogo pitaniya. *Silovaya elektronika*. 2009;22:66–71. (In Russ.) [cited: 09.03.2023] Available from: [https://power-e.ru/wp-content/uploads/2009\\_4\\_66.pdf](https://power-e.ru/wp-content/uploads/2009_4_66.pdf)
3. Hava AM, Çetin NO. A Generalized Scalar PWM Approach with Easy Implementation Features for Three-Phase, Three-Wire Voltage-Source Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010;26(5):1385–1395. doi: 10.1109/TPEL.2010.2081689
4. Dmitriev BF, Galushin SYa, Likhomanov AM, Rozov AYu. Trekhfaznaya sinusoidal'naya modifitsirovannaya shirotno-impul'snaya modulyatsiya pervogo roda v avtonomnykh invertorakh. *Morskoi vestnik*. 2017;1(61):S. 69–72. (In Russ.) [cited: 09.03.2023] Available from: [http://morvest.ru/Full%20articles/MV-61\\_to%20Web.pdf](http://morvest.ru/Full%20articles/MV-61_to%20Web.pdf)
5. Mao X, Ayyanar R, Krishnamurthy HK. Optimal variable switching frequency scheme for reducing switching loss in single-phase inverters based on time-domain ripple analysis. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009;24(4):991–1001. doi: 10.1109/TPEL.2008.2009635
6. Bulatov OG, Oleshchuk VI. Avtonomnye tiristornye inventory s uluchshennoi formoi vykhodnogo napryazheniya. Kishinev: Shtiintsa, 1980. (In Russ.)
7. Gus'kov VO, Lavin AV. Sravnitel'nyi analiz matematicheskikh opisaniy i metodov shirotno-impul'snoi modulyatsii. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2023;3:74–81. (In Russ.) doi: 10.24143/2073-1574-2023-3-74-81
8. Hava AM, Kerkman RJ, Lipo TA. A High Performance Generalized Discontinuous PWM Algorithm. *IEEE Transactions on Industry applications*. 1998;34(5):1059–1071. doi: 10.1109/28.720446
9. Orlov YuI, Petrenko YuN. A search algorithm for optimizing the output voltage of an inverter. *Technical electrodynamic*s. 1986;4:50–57.
10. Tan G, Deng Q, Liu Z. An optimized SVPWM strategy for five-level active NPC (5L-ANPC) converter. *IEEE Transactions on power electronics*. 2013;29(1):386–395. doi: 10.1109/TPEL.2013.2248172

11. Tomasov VS, Usol'tsev AA, Vertegel DA, Denisov KM. Issledovanie pul'satsii elektromagnitnogo momenta v pretsizionnom servoprivode pri sinusoidal'noi shirotno-impul'snoi modulyatsii. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. 2019;19(2):359–368. (In Russ.) doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-359-368
12. Belousov IV, Samoseiko VF, Saushev AV. Assessment of filtering properties of asynchronous electric drive with pulse width modulation. *E3S Web of Conferences*. 2022;363:1–8. doi: 10.1051/e3sconf/202236301025
13. Hava AM, Çetin NO. A Generalized Scalar PWM Approach with Easy Implementation Features for Three-Phase, Three-Wire Voltage-Source Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2011;26(5):1385–1395. doi: 10.1109/TPEL.2010.2081689
14. Bakhovtsev IA, Zinoviev GS. Generalized analysis of the output energy of multiphase multilevel voltage inverters with pulse-width modulation. *Electricity*. 2016;4:26–33. EDN: WALPQZ
15. Chaplygin EE, Khukhtikov SV. Pulse width modulation with passive phase in three-phase voltage inverters. *Electricity*. 2011;5:53–61. EDN: NRBWQP
16. Nayeemuddin M, Rao C. Space Vector Based High Performance Discontinuous Pulse Width Modulation Algorithms for VSI Fed AC Drive. *Innovative Systems Design and Engineering (IJSR)*. 2016;5(7):203–208. [cited: 09.03.2023] Available from: <https://www.ijer.net/archive/v5i7/NOV164785.pdf>
17. Anuchin AS, Gulyaeva MA, Shpak DM, et al. Minimization and redistribution of switching losses in a voltage inverter using a pulse width modulation algorithm with prediction. *Bulletin of the MEI*. 2019;1:79–85. doi: 10.24160/1993-6982-2019-1-79-85

#### Сведения об авторах:

**Саушев Александр Васильевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и электрооборудования береговых установок»;  
eLibrary SPIN: 9692-8603; ORCID: 0000-0003-2657-9500;  
E-mail: saushev@bk.ru

**Белюсов Игорь Владимирович**, доцент кафедры «Электропривод и электрооборудования береговых установок»;  
eLibrary SPIN: 9055-5945; ORCID: 0000-0002-9754-1318;  
E-mail: igor5.spb@yandex.ru

**Бова Елена Владимировна**, доцент кафедры «Электропривод и электрооборудования береговых установок»;  
eLibrary SPIN: 6074-8082; ORCID: 0000-0003-3677-3075;  
E-mail: elena.bova2015@bk.ru

**Румянцев Алексей Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и электрооборудования береговых установок»;  
eLibrary SPIN: 1239-5936; ORCID: 0000-0001-9080-515X;  
E-mail: stehnika@mail.ru

**Information about the authors:**

**Aleksandr V. Saushev**, Dr. Sci (Tech), Head of the Department of Electric Drive and Electrical Equipment Shore Installations; eLibrary SPIN: 9692-8603; ORCID: 0000-0003-2657-9500; E-mail: saushev@bk.ru

**Igor V. Belousov**, Associate Professor, Department of Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations; eLibrary SPIN: 9055-5945; ORCID: 0000-0002-9754-1318; E-mail: igor5.spb@yandex.ru

**Elena V. Bova**, Associate Professor, Department of Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations; eLibrary SPIN: 6074-8082; ORCID: 0000-0003-3677-3075; E-mail: elena.bova2015@bk.ru

**Alexey Yu. Rumyantsev**, Cand. Sci (Tech), Associate Professor, Department of Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations; eLibrary SPIN: 1239-5936; ORCID: 0000-0001-9080-515X; E-mail: stehnika@mail.ru

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Строительные конструкции и транспортные системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst626502>

© Н.А. Сенькин, В.М. Закарлюкина, Э.В. Давидюк, П.А. Ли,  
И.С. Большихшапок

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный  
университет (Санкт-Петербург, Россия)

## КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТРАНСПОРТНО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МАГИСТРАЛИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

**Обоснование.** Развитие Северного Морского Пути (СМП) представляет особый интерес для транзита грузов и судов, а также для интенсификации добычи полезных ископаемых на шельфе и прибрежных территориях страны. В августе 2022 года правительство утвердило план развития СМП до 2035 года. План включает в себя 150 мероприятий, которые входят в пять ключевых разделов, включая транспортную и электроэнергетическую инфраструктуру. В настоящий момент уровни транспортной доступности и инфраструктуры данного региона находятся на недостаточном уровне для эффективного использования полного потенциала Заполярной территории. Для обеспечения надежного функционирования СМП предлагается создать дополнительную высокоскоростную грузопассажирскую систему, характеризующуюся движением грузовых модулей со скоростью до 200 км/ч и пассажирских модулей – до 500–1000 км/ч. Предполагается, что проектируемая магистраль позволит соединить ключевые транспортно-логистические морские порты для ледокольного флота и в кратчайшие сроки обеспечить экстренную доставку пассажиров, оборудования и грузов при возникновении чрезвычайных ситуаций.

**Цель.** Разработка высокоскоростной транспортно-энергетической магистрали в Арктической зоне, построенной на широком применении электротранспорта.

**Материалы и методы.** Построен маршрут магистрали, рассчитаны эстакадные конструкции на сочетании действующих нагрузок, сил и воздействий, включая учет динамических аспектов и нелинейности, с использованием программных комплексов SAP2000, «SCAD Office» и «Lira».

**Результаты.** По предварительным технико-экономическим расчетам предполагается, что продолжительность доставки грузов по Арктической сверхскоростной магистрали до Берингова пролива по сравнению с СМП сократится в 5,5 раза, а пассажиров – почти в 30 раз, но при этом протяженность проектируемой скоростной магистрали почти в 1,6 раза выше в связи с необходимостью обхода высоких прибрежных горных массивов, особенно в шельфе Восточно-Сибирского моря.

**Закключение.** При проектировании глобальной сухопутной высокоскоростной транспортной сети данные исследования подтверждают возможность использования технологий Evacuated Tube Transportation и Маглев для Арктической сверхскоростной транспортной магистрали. В дальнейших исследованиях будут рассмотрены туннельные горные проходки и подводные трубные магистрали, которые приведут к протяженным прямолинейным участкам длиной более 1000 км, обеспечивающим сокращение общей протяженности АТЭМ, продолжительности транспортировки пассажиров и грузов и минимизацию количества транспортно-пересадочных узлов (ТПУ).

**Ключевые слова:** арктические условия эксплуатации; высокоскоростная транспортно-энергетическая магистраль; арочная эстакада из труб большого диаметра; магнитно-левитационная подушка; пониженное давление в трубах; опоры линии электропередачи.

### Как цитировать:

Сенькин Н.А., Закарлюкина В.М., Давидюк Э.В., Ли П.А., Большихшапок И.С. Конструктивно-технологические предложения по созданию высокоскоростной транспортно-энергетической магистрали в Арктике // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 247–273. doi: 10.17816/transsyst626502

---

## Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Construction structures and transportation system

© N.A. Senkin, V.M. Zakarlyukina, E.V. Davidyuk, P.A. Lee,  
I.S. Bolshikhshapok

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering  
(St. Petersburg, Russia)

### CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL PROPOSALS FOR THE CREATION OF A HIGH-SPEED TRANSPORT AND ENERGY HIGHWAY IN THE ARCTIC ZONE

**Background.** St. Petersburg University of Architecture and Civil Engineering is developing alternative proposals creating a high-speed highway in the Arctic zone along the Northern Sea Route. This project includes stops at major transport and logistics centers along the country's coast as part of research by future master builders. The Arctic Transport and Energy Highway originates in the Northwestern region of Russia, starting from the seaport of Ust-Luga. The route passes through the Leningrad and Arkhangelsk regions, the Polar regions of European Russia, Siberia, Chukotka, and ends in Alaska via the Bering Strait, thereby connecting two continents. The structure of this highway includes an overhead power line with a voltage of 330 kV running along its entire length on common load-bearing structures. This line will connect to the main electric networks of the country, including the floating power plant Akademik Lomonosov in the port of Pevek. South of Gatchina in the Leningrad Region, a large Transport Interchange Hub is proposed, where an urban high-speed transportation highway from St. Petersburg will connect to the highway. The results of scientific research on the layout and architectural design of transportation hubs are presented.

**Aim.** The aim of this study is the development of a high-speed transport and energy highway in the Arctic zone, based on the widespread use of electric transportation.

**Materials and Methods.** The highway route was built, and trestle structures were designed to handle combinations of operating loads, forces and influences. These designs account for dynamic aspects and nonlinearity, using software such as SAP2000, SCAD Office, and Lira.

**Results.** Preliminary technical and economic indicators show that the duration of cargo delivery along the Arctic Expressway to the Bering Strait is reduced by 5.5 times compared to the Northern Sea Route, and passenger travel time is reduced by almost 30 times. However, the projected expressway is almost 1.6 times longer owing to the need to bypass high coastal mountain ranges.

**Conclusion.** These studies confirm the feasibility of using evacuated tube transportation and maglev technologies for the Arctic high-speed transportation highway. Future research will consider tunnel mining and underwater pipelines, which will allow for extended rectilinear sections exceeding 1000 km. This would reduce the total length of the Arctic transportation and energy highway, decrease transportation duration for passengers and cargo, and minimize the number of transportation hubs.

**Keywords:** Arctic operating conditions, high-speed transport and energy highway, arched overpass of large diameter pipes, magnetic levitation cushion, low pressure in pipes, power transmission line supports.

#### To cite this article:

Senkin NA, Zakarlyukina VM, Davidyuk EV, Li PA, Bolshikhshapok IS. Constructive and technological proposals for the creation of a high-speed transport and energy highway in the Arctic. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(2):247–273. doi: 10.17816/transsy626502

## ВВЕДЕНИЕ

Выдающийся экономист и организатор в области развития транспортных технологий профессор Анатолий Александрович Зайцев (06.02.1940–13.02.2022) однозначно определил будущее за магнитолевитационной транспортной технологией, которая обеспечит создание общенациональной системы сверх- и высокоскоростного наземного пассажирского и грузового транспорта. Такая транспортная система будет иметь неоспоримые преимущества перед другими транспортными технологиями в ускорении перевозок, что приведет к значительному социальному и экономическому эффекту [1].

Одним из самых грандиозных проектов нашего новейшего времени станет создание трансконтинентальной высокоскоростной магистрали через Берингов пролив.

Известны несколько значимых попыток по строительству транспортных магистралей через Берингов пролив от времени Императора Николая Александровича Романова, высочайше одобдившего предложение о строительстве Сибирско-Аляскинской железной дороги от мыса Принца Уэльского на Аляске в Иркутск, до времен современных, когда на Международной конференции в Москве в 2007 году была поддержана идея строительства «Трансконтинентальной Магистрали Евразия – Америка через Берингов пролив» [2] с целью формирования единой глобальной сухопутной транспортной сети со связью транспортных и энергетических систем Евразии и Америки. Кроме того, в марте 2015 года Президент РАН В.Е. Фортов (1946–2020) передал главе государства В.В. Путину четыре больших масштабных проекта, нацеленных на глобальное развитие страны, включая предложения по строительству скоростной железной дороги через Сибирь с выходом на Берингов пролив. Этот проект «Развитие», позволит решить многие проблемы огромного региона Сибири и Дальнего Востока [3].

В Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете (СПбГАСУ) в рамках студенческих научных исследований по теме «Инновационные предложения по созданию высокоскоростной транспортной системы Санкт-Петербурга», в частности, выполняются инициативные разработки альтернативных предложений по созданию окружной наземной высокоскоростной транспортной магистрали (ВСТМ) [4]. Городские ВСТМ системы «Роса» будут запроектированы на движение высокоскоростных пассажирских электропоездов с максимальной скоростью 500 км/ч с применением технологий Маглев

и ЕТТ (Evacuated Tube Transportation) [4–17]. Так в первой авторской статье под названием «К вопросу создания высокоскоростной транспортной магистрали в Санкт-Петербурге», опубликованной в электронном журнале «Транспортные системы и технологии» в 2019 году, разработана основная концепция ВСТМ «Роса» и представлены результаты научно-исследовательских работ (НИР) за 2017–2019 гг. по вышеуказанной теме (Часть 1). Разработана окружная «кольцевая» и технологическая системы магистрали, жесткая главная балка путепровода, представляющая собой составную многотрубную конструкцию с рельсовым путем 1520 мм и пониженным внутренним давлением на скоростных участках в каждой трубе, составляющим 1/10 от нормального атмосферного. В области строительных конструкций выполнено вариантное проектирование вантово-стержневых систем с выбором основного арочно-вантового варианта эстакадной конструктивной схемы, обеспечивающего жесткую поддержку балки путепровода.

В следующей статье «Предложения по строительству эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали в Санкт-Петербурге» в 2021 году в продолжение данной темы представлены результаты НИР за 2019–2021 гг. (Часть 2), а именно: модернизация схемы прокладки транспортной магистрали; архитектурная компоновка зданий ТПУ; исследование предварительного напряжения затяжек и вант на снижение основных усилий и деформаций элементов; расчеты конструкций наиболее высокого и нагруженного морского участка.

В третьей статье [4] по итогам исследований 2021–2022 годов (Часть 3) выполнен анализ влияния наклона транспортной магистрали на внутренние усилия в элементах, исследования эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали для применения на Арктических участках при скорости движения на грузовых путях до 160 км/ч и пассажирских – до 1000 км/ч включительно.

В настоящей статье по результатам НИР 2022–2023 гг. (Часть 4) предлагается дальнейшее развитие транспортной магистрали, основная часть которой прокладывается в Арктической зоне страны. При этом в ее структуре по всей протяженности на общих несущих конструкциях предусматривается прокладка воздушной линии электропередачи напряжением 330 кВ (ВЛ 330 кВ) с подключением к основным электрическим сетям на севере страны, включая плавучую электростанцию «Академик Ломоносов» в порту Певек. Кроме того, южнее г. Гатчина

(Ленинградская обл.) предлагается построить большой ТПУ с депо, где к АТЭМ предполагается подвести городскую ВСТМ из Санкт-Петербурга.

## НОВАЯ СХЕМА АРКТИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МАГИСТРАЛИ

Развитие арктических регионов нашей страны является одним из наиболее перспективных путей развития экономики России, в связи с большими запасами природных ископаемых и высокими туристическими перспективами. Данная гипотеза подтверждается планом развития Северного морского пути (СМП), принятым в 2022 году [18, 19]. СМП на сегодняшний день является практически единственным доступом к ресурсам Арктического шельфа и побережья. Его развитие приведет к увеличению рабочих мест и численности населения Крайнего Севера, развитию международных связей, морского транспорта и показателей экономического роста.

Инновационная сверхскоростная АТЭМ, изображенная на Рис. 1, представляет собой уникальное техническое решение, приводящее к синергетическому единству современной технологии и «ранимой» природы Крайнего Севера, что обеспечит его устойчивое развитие, повышение жизненного уровня местного населения и высокие инвестиции в развитие арктических регионов.

Основная идея Арктической магистрали заключается в том, чтобы создать наиболее короткий и прямой маршрут через Арктику, который позволит обойти длинные и загруженные проливы Северного



**Рис. 1.** Общий вид АТЭМ с ТПУ «Колымский залив»

**Fig. 1.** General view of the arctic energy transportation highway (AETH) with the «Kolyma Bay» interchange hub (IH)

Ледовитого Океана, такие как Лонга, Поморский, и сократить расстояние между Европейской и Азиатской частями России и Аляской. Указанное обстоятельство будет способствовать повышению безопасности функционирования ледокольного флота, а также развитию межконтинентальной торговли, улучшению доступности ресурсов и повышению экономического потенциала Арктических регионов.

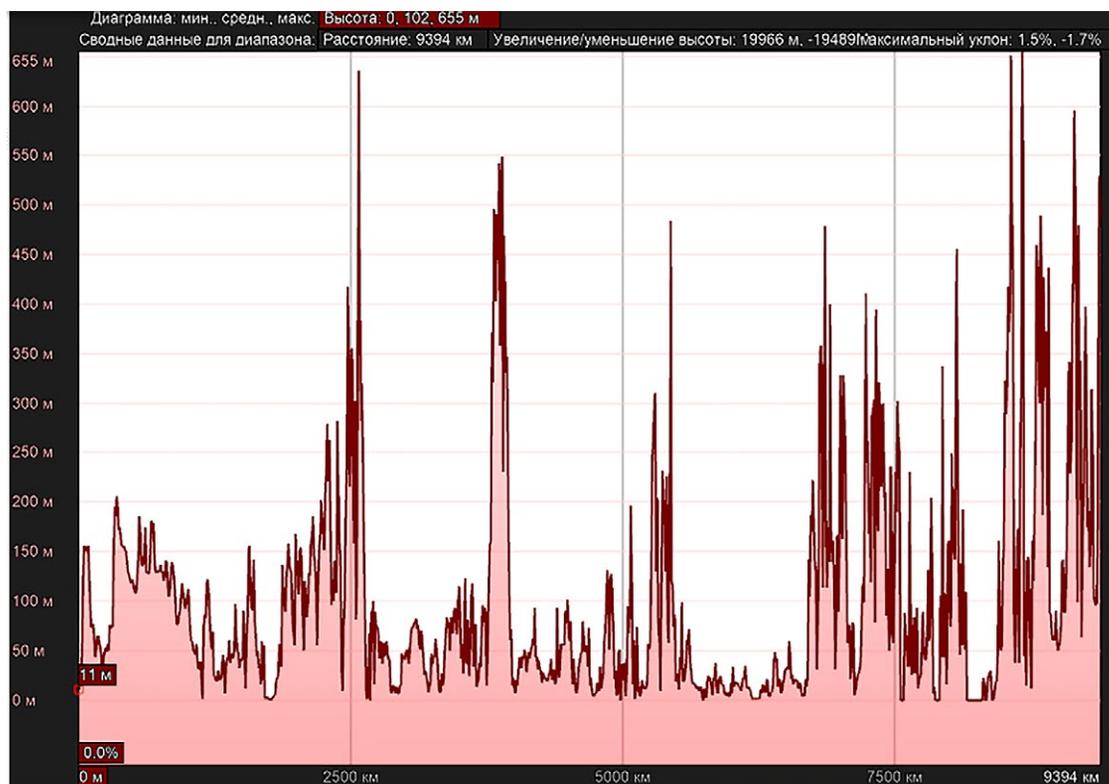
Арктическая магистраль позволит сократить время и стоимость перевозки грузов между Азией и Европой, открыв новые перспективы для торговли и экономического развития региона. Проект предусматривает строительство новых портов, развитие инфраструктуры и создание специализированных ледоколов, способных обеспечивать безопасную навигацию даже в самых сложных ледовых условиях.

Реализация предложенного проекта позволит решить основную проблему Северного морского пути – обеспечение безопасности населения и персонала ледокольного флота. При надежной круглосуточной и высокоскоростной эксплуатации магистрали закрываются вопросы эвакуации рабочего персонала, экстренной транспортировки ремонтных бригад при чрезвычайных происшествиях на объектах шельфа и побережья Ледовитого океана. Обеспечивается быстрое реагирование на аварии, что приведет к минимизации необратимых последствий и финансовых затрат.

Магистраль планируется начать на базе контейнерного флота в Усть-Луге, а дальше она пройдет по Ленинградской, Вологодской, Архангельской областям, далее через Заполярный регион, Сибирь и Чукотку она должна прийти к Берингову проливу. Авторами настоящего исследования также предложено провести арктическую магистраль далее до Аляски. Реализация предложенного проекта приведет к развитию береговой, электроэнергетической и аварийно-спасательной инфраструктур, за счет обеспечения транспортной доступности отдалённых районов.

В рамках представленного исследования была разработана новая схема АТЭМ. Предложенное ранее решение схемы [4] потребовало доработки в части уточнения расположения транспортно-пересадочных узлов. Предлагаемая схема позволяет сократить время в пути от начала до конца маршрута, а также снизить стоимость реализации проекта.

Горная местность значительно усложнила прокладку АТЭМ, приводя к необходимости более частого расположения пересадочных узлов, например, в районе Северо-Сибирской низменности из-за необходимости огибания хребтов и речных каналов, что невозможно сделать изменением уклона самого путепровода. Диаграмма высот представлена на Рис. 2.



**Рис. 2.** Диаграмма высот (развертка линии рельефа Усть-Луга – Fairbanks)  
**Fig. 2.** Elevation diagram (Ust-Luga – Fairbanks relief line sweep)

Новое расположение магистрали диктуется не только сложными условиями горного рельефа, но и необходимостью размещения ТПУ вблизи крупных портов и поселений на прибрежных арктических территориях.

В данной статье представлен новый вариант схемы АТЭМ, отличающейся сокращением протяженности пути с 9683 км [4] до 9524 км, что приведет к снижению продолжительности поездки и инвестиционных затрат за счет исключения некоторых транспортно-пересадочных узлов с 43 [4] до 40 единиц. Таким образом, время в пути по новой схеме прокладки при скорости 160 км/ч для грузов составит 61,2 ч, а для пассажиров – 500 км/ч – 20,5 ч, 1000 км/ч – 10,83 ч. На Рис. 3 представлена линия АТЭМ с расположением ТПУ от Усть-Луги до Аляски.

На данном этапе удалось решить проблему сложного рельефа за счет обхода высоких гор. В перспективе развития транспортного и горного строительства возможен вариант преодоления гор напрямую [20–23], например, прокладкой туннелей, и, как следствие, сокращение протяженности пути за счет спрямления и исключения из состава магистрали некоторых ТПУ.



**Рис. 3.** Общий вид АТЭМ (АТЭМ – синяя линия, трасса ВЛ 330 кВ от Певека – красная, ВСТМ Санкт-Петербурга: ТПУ «Рыбацкое» – ТПУ «Гатчина» – желтая линия)

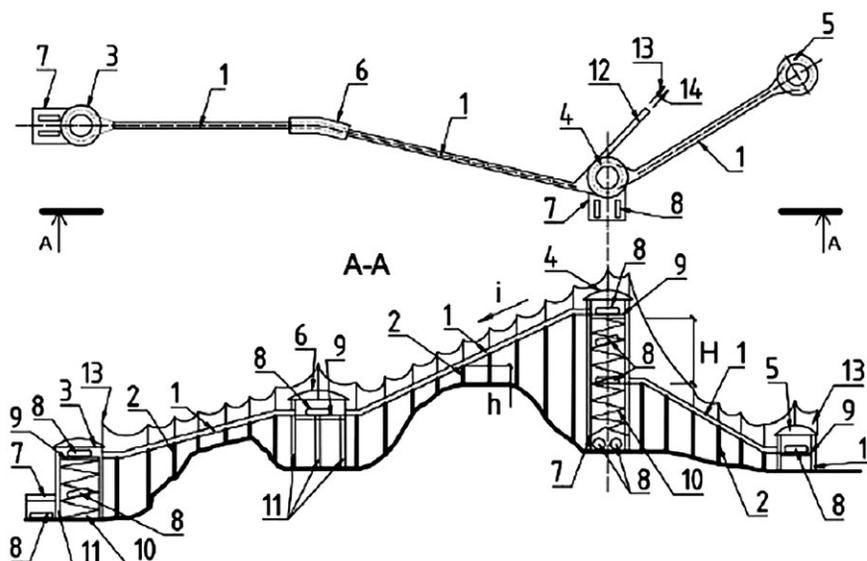
**Fig. 3.** General view of the AETH (AETH – blue line, 330 kV overhead line route from Pevek – red line, St. Petersburg VSTM: IN Rybatskoye – IN Gatchina – yellow line)

На Рис. 4 представлена основная технологическая структура транспортно-энергетической магистрали [4].

Согласно ранее предложенным конструктивным решениям [4], пролетные строения путепровода поддерживались арочно-вантовыми системами. Указанное решение не приемлемо в условиях Арктики по причине значительных гололедных образований на строительные конструкции, создающих нерасчетные нагрузки на вантовые элементы, поэтому потребовалась разработка принципиально новых решений, отличных от вантовых.

### КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ АТЭМ

Разработка конструктивно-технологических решений, обеспечивающих функционирование, требуемую надежность, безопасность, а также снабжение электроэнергией арктических регионов и транспортного оборудования является основным направлением при конструировании несущих конструкций АТЭМ. Для приближенного учета особых полярных условий при проектировании сооружений АТЭМ расчетный климатический район в выполняемых ниже проектах принят на один выше [24, 25]. Например, для порта Певек назначается расчетный



**Рис. 4.** Основная технологическая структура транспортно-энергетической магистрали (элементы и варианты)

1 – балка-путепровод; 2 – многопролетная эстакада; 3 – здание ТПУ с кольцевым пандусом, позволяющим подъем-спуск состава по вертикали при движении по спирали (вариант 1); 4 – то же, с Т-образным перекрестком (вариант 2); 5 – здание ТПУ с кольцевым перроном для разворота составов (вариант 3); 6 – то же, для поворота магистрали (вариант 4); 7 – здание депо; 8 – состав из транспортных модулей; 9 – перрон для посадки и высадки пассажиров; 10 – спиральный пандус; 11 – опорные колонны здания ТПУ с лестницами и лифтами; 12 – ответвление путепровода; 13 – воздушная линия электропередачи; 14 – кабельная линия электропередачи;  $h$  – высота положения балки-путепровода относительно земной поверхности;  $H$  – перепад высот по высоте между двумя положениями балки-путепровода магистрали

**Fig. 4.** Basic technological structure of the transportation-energy highway (elements and variants)

1 – beam-puteway; 2 – multi-span trestle; 3 – IH building with a circular ramp that allows the train to be lifted and lowered vertically when traveling in a spiral (variant 1); 4 – the same, with T-junction (variant 2); 5 – IH building with a circular apron for turning trains (variant 3); 6 – the same, for turning the main line (variant 4); 7 – depot building; 8 – train of transportation modules; 9 – apron for passenger boarding and disembarkation; 10 – spiral ramp; 11 – supporting columns of the IH building with stairs and elevators; 12 – overpass branch; 13 – overhead power transmission line; 14 – cable power line;  $h$  – height of the position of the beam-puteproved relative to the ground surface;  $H$  – height difference in height between two positions of the girder-puteproved of the main line

ветровой район V, на один район выше нормативного IV района по Картам районирования, прилагаемым к СП 20.13330.2016 (с Изм.1–4) «Нагрузки и воздействия». Кроме того, на устраиваемой одноцепной воздушной линии (ВЛ) электропередачи напряжением 330 кВ (ВЛ 330 кВ) в составе АТЭМ устроены четыре фазы (одна резервная) с целью обеспечения высокой надежности электроснабжения транспортного оборудования.

Далее, для выбора оптимального решения конструктивной основы магистрали, а именно высотных и большепролетных несущих конструкций, поддерживающих балку путепровода и опоры ВЛ 330 кВ, выполнены расчеты с подбором сечений четырех вариантов конструкции АТЭМ, исключая вантажные элементы (оттяжки и внешние затяжки). В первом варианте будут применены два компактированных провода в фазе типа АСПк 300/39 с треугольной решеткой связей, соединяющей две арки синусообразного очертания, во втором тот же провод, но с применением решетки из связей с нисходящими раскосами, в третьем варианте – один компактированный провод в фазе типа GZTACSR600 и треугольная решетка, в четвертом – тот же провод, но раскосная решетка с нисходящими раскосами. Характеристики данных проводов приведены в Табл. 1, включая обычный некомпактированный провод марки АС300/39 с повивами из круглых проволок.

Главная балка путепровода выполнена четырехтрубной с рельсовым основанием в каждой трубе, отведенным под транспортные нужды, возникающие при разгоне, торможении и аварийных ситуациях. Сечение

**Таблица 1.** Исходные характеристики проводов и грозотросов

**Table 1:** Initial characteristics of wires and lightning ropes

Наименование и основные характеристики	АСПк 300/39	АС 300/39	GZTACSR 600	Грозотрос ОКГТ-С-24-13,1 мм-45кА2·с-120 кН
Номинальное сечение, мм <sup>2</sup> (алюминий/сталь)	300/39	300/39	615,7/56,29	95,2
Диаметр, мм	21,7	24,0	31,5	13,1
Диаметр стального сердечника, мм	11,5	7,95	9,6	93,6
Масса 1 км провода, кг	1116	1132	2179	640
Модуль деформации, МПа	114000	77000	205900	200000



АС 300/39, поэтому стрела провеса также будет меньше в 1,48 раза, несмотря на равное номинальное сечение.

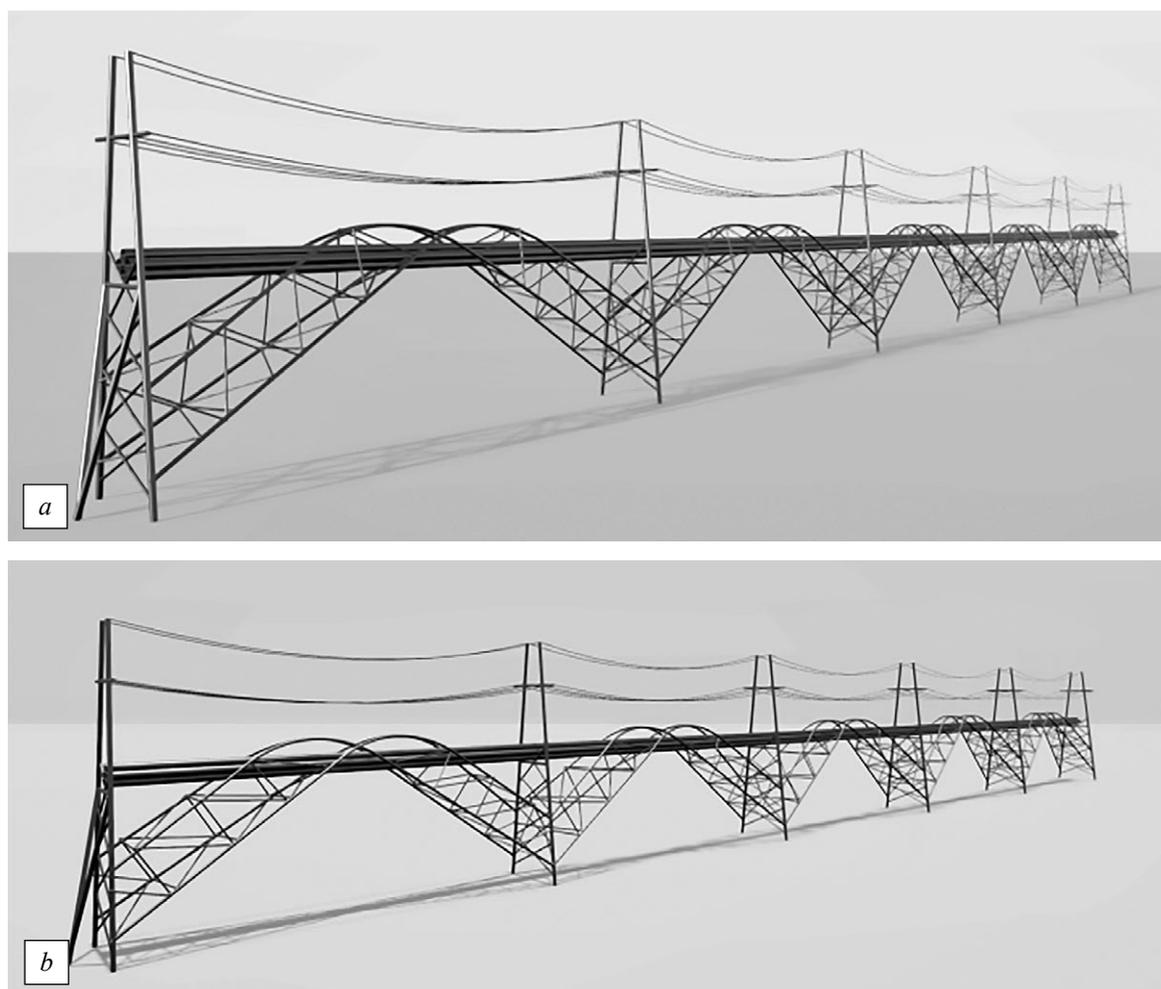
Выполнены расчеты четырех вариантов конструкции с определением нормальных и касательных напряжений в элементах и перемещений узлов с использованием программного комплекса SAP2000 на расчетные сочетания нагрузок и воздействий (воздействия от собственного веса конструкций, снеговых, ветровых, гололедных нагрузок, нагрузок от подвижного состава, включая продольные нагрузки от торможения-разгона составов и нагрузки от ВЛ). Расчет ВЛ, входящих в конструкцию опор путепровода, производился для сочетания следующих условий в соответствии с ПУЭ-7: максимальная температура при отсутствии ветра и гололеда; минимальная температура при тех же условиях; среднегодовая температура при тех же условиях; наличие гололеда при отсутствии ветра; наличие ураганного ветра при отсутствии гололеда; ветер и гололед действуют совместно; аварийные режимы; монтажный режим. В результате вычислены абсолютные значения перемещений и усилий.

Окончательно, на основании результатов расчета (усилия и прогибы) определен оптимальный вариант № 3 при использовании провода GZTASR 600 (отечественное производство) и треугольной решетки расположения связей на синусообразной арке Табл. 2. Данный вариант оказался менее металлоемким, нежели вариант с раскосной решеткой, на 1,74%. Кроме того, вариант при использовании одного провода в фазе показал наименьшие нагрузки, а схемы с данным проводом показали наименьшие перемещения. Расход стали для 1 и 3 вариантов схем составил 37,78 т на пог.м магистрали, для 2 и 4-го вариантов – 38,45 т/м.

Далее, по полученным значениям усилий и прогибов, были подобраны сечения элементов конструкции. В результате в качестве основных несущих элементов были приняты стальные трубы большого диаметра из стали С390. Наприме, главная транспортная балка составлена из четырех труб диаметром 3,85 м с толщиной стенки 25 мм. Колонны рамы выполнены из стальных труб наружным диаметром 2,0 м с толщиной стенки 25 мм. При этом вертикальные и наклонные элементы выполнены трубобетонными. Элементы синусоидальных арок и траверсы запроектированы из труб диаметра 1,50 м с толщиной стенки 40 мм. Связи для 1 и 2 вариантов выполнены из труб сечением 0,78 м с толщиной стенки 20 мм, для связей 3 и 4 вариантов – трубы диаметром 0,86 м. Пилоны запроектированы в виде рамной системы, стойки которой представлены трубобетонными элементами, являющимися продолжением

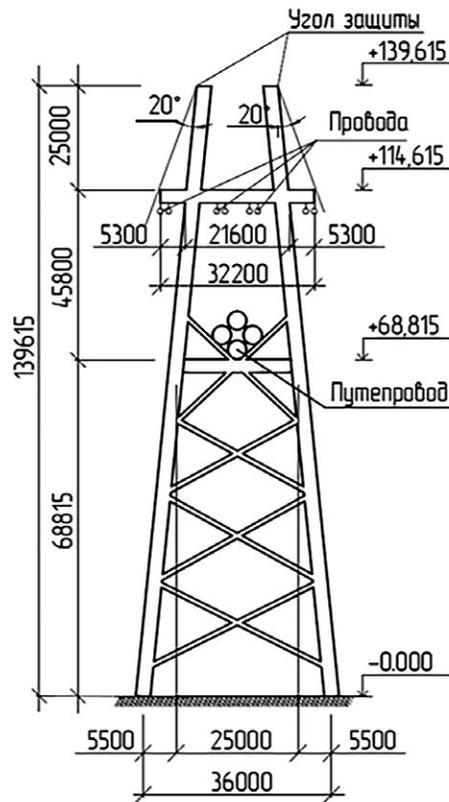
свайной подземной части конструкции. Сверху на трубобетонные колонны установлены стойки аналогичного сечения для опор линии электропередачи ВЛ 330 кВ (см. Рис. 6). Для сопряжения частей и секций применены болтовые соединения на высокопрочных болтах.

Главным критерием оценки эффективности решения является металлоемкость, которая напрямую влияет на стоимость реализации пролетного строения [24, 25]. Из опыта по возведению Маглев-линий компании Transrapid основная часть затрат уходит на возведение ТПУ и магистралей. Наиболее эффективное конструктивное решение (вариант № 3) было принято в результате выбора конструкций из четырех вариантов.

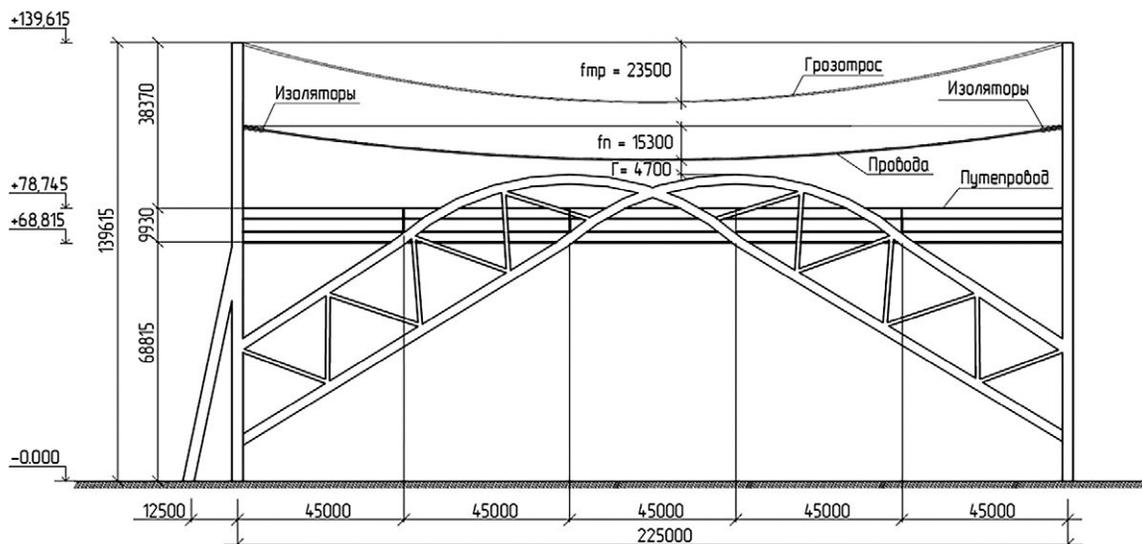


**Рис. 6.** Конструкции блока хребтовых арок с треугольной решеткой, соединяющей две арки синусообразного очертания (а); то же, с раскосной решеткой (б)

**Fig. 6.** Ridge arch block constructions with triangular lattice connecting two arches of sinusoidal outline (a); the same, with strut lattice (b)



**Рис. 7.** Поперечный вид рамы-колонны:  
два провода в фазе АСПк 300/39 (вариант 1)  
**Fig. 7.** Cross-sectional view of the frame-column:  
two wires in phase ASPk 300/39 (variant 1)



**Рис. 8.** Продольный вид одного пролета: четыре арки с треугольной решеткой  
объединяющих их связей (вариант 1)  
**Fig. 8.** Longitudinal view of a single span: four arches with a triangular lattice  
of connecting links (variant 1)

## КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ТПУ «ГАТЧИНА»

Решение задачи оптимизации конструктивно-технологического исполнения транспортно-пересадочных узлов рассмотрено на примере большого ТПУ «Гатчина», поскольку он является наиболее нагруженным и сложным и связывает два направления магистралей: арктическое АТЭМ и ВСТМ из Санкт-Петербурга. Кроме того, в составе с ТПУ «Гатчина» на земной поверхности предусматривается расположение депо для ремонта и хранения составов.

По проведенным ранее исследованиям [4] было выяснено, что наиболее эффективным решением является кольцевая схема ТПУ, включающая кольцевой пандус для перемещения составов по ярусам и спуска в депо. В предлагаемой работе рассмотрено несколько вариантов конструирования спирального пандуса – геликоида из сталежелезобетона. В результате исследования выявлены зависимости напряженно-деформированного состояния геликоида от его геометрических параметров при помощи конечно-элементного моделирования.



**Рис. 9.** Общий вид ТПУ «Гатчина» радиусом 141,0 м с обходящей ВЛ 330 кВ  
**Fig. 9.** General view of the “Gatchina” IH with a radius of 141.0 m with a 330 kV overhead line bypassing it



Разбиение пластинчатого геликоида произведены на 4-узловые пластинчатые конечные элементы с точностью, необходимой для корректного отображения изополей. Локальные оси пластин направлены в соответствии с углами поворота.

Согласно п. 6.1 СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» расчет выполнен в два этапа:

1. Проверка на стадии монтажа;
2. Проверка на стадии эксплуатации.

На этапе проверки конструкции на стадии монтажа проверена несущая способность профилированного листа и устойчивость его стенок от собственного веса, веса свежесложенной бетонной смеси, технологической нагрузки от бетононасосов, веса гибкой арматуры. По результатам расчета подобран профлист Н114-750-1. Далее в рамках предлагаемого исследования рассматривается несколько вариаций исполнения участка ТПУ при расчете на стадии эксплуатации.

Анализировалась зависимость нормальных и касательных напряжений от изменения продольного уклона. По результатам расчета методом КЭ были построены графики с полиномиальной линией тренда третьего порядка. Результаты представлены на Рис. 11–14.

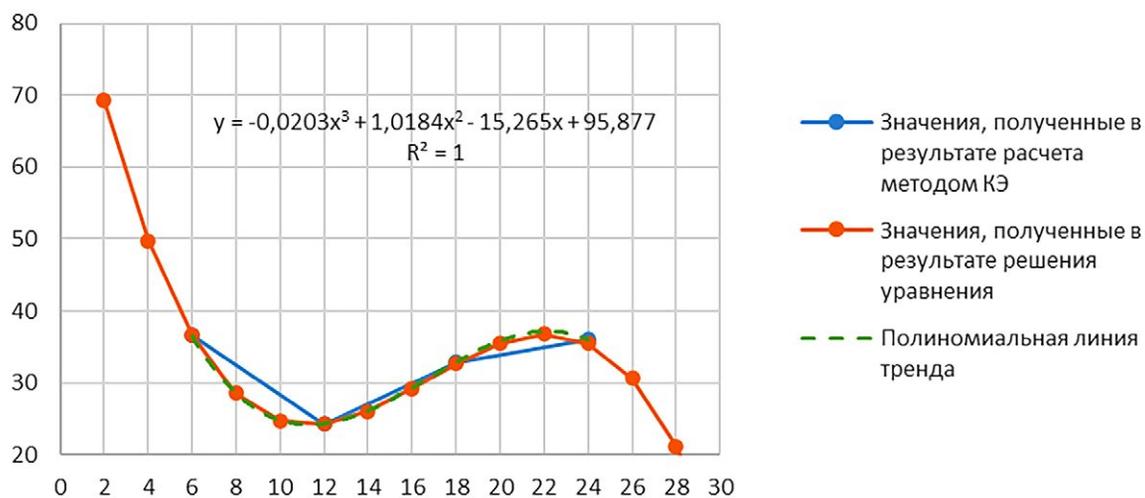
Значения нормальных напряжений по направлению наибольшей жесткости в диапазоне от 6 до 12 метров понижаются, далее наблюдается их рост до отметки 22 м, а потом опять спад. Наиболее низкие значения находятся в диапазоне от 7 до 18 м и далее при значениях больше 24 м.

Так, наиболее низкое значение напряжений по направлению меньшей жесткости наблюдается в диапазоне от 6 до 24 м, следовательно наиболее оптимальным будет значение из указанного диапазона.

График касательных напряжений описывается кубической параболой с точкой экстремума 14 м, парабола, описывающая значения напряжений на внешней опоре, имеет восходящие ветви. Данные результаты позволяют сделать вывод о почти одинаковых значениях касательных напряжений в точках 12 и 16 м, 10 и 18 м.

При рассмотрении нормальных напряжений по направлению наибольшей жесткости значения в диапазоне 6–12 метров (9,6–19,1%) понижаются, далее наблюдается их рост до отметки 22 м (35%), а потом – снова спад. При рассмотрении нормальных напряжений по направлению наименьшей жесткости до отметки 18 м (28,6%) наблюдается снижение значений напряжений, а далее проявляется тенденция к их росту.

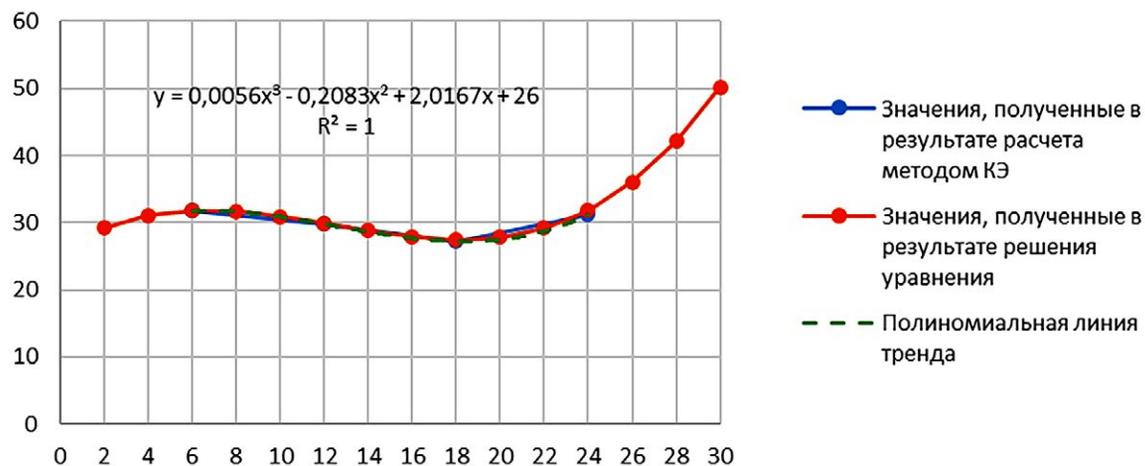
### Зависимость нормальных напряжений в направлении большей жесткости от высоты витка



**Рис. 11.** График зависимости нормальных напряжений по направлению большей жесткости от высоты витка (по горизонтали)

**Fig. 11.** Graph of dependence of normal stresses in the direction of higher stiffness on the height of the coil (horizontally)

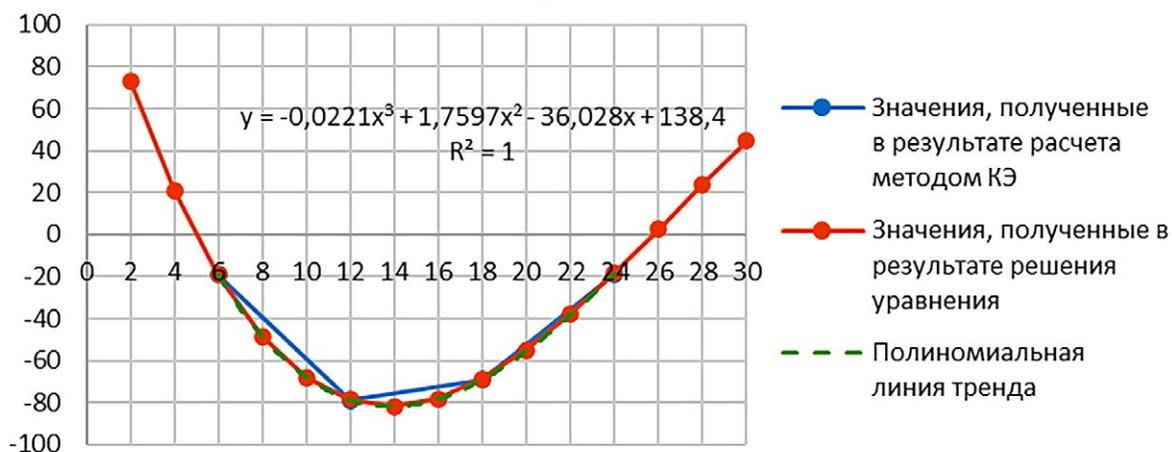
### Зависимость нормальных напряжений в направлении наименьшей жесткости от высоты витка



**Рис. 12.** График зависимости нормальных напряжений по направлению меньшей жесткости от высоты витка (по горизонтали)

**Fig. 12.** Graph of dependence of normal stresses in the direction of lower stiffness on the height of the coil (horizontally)

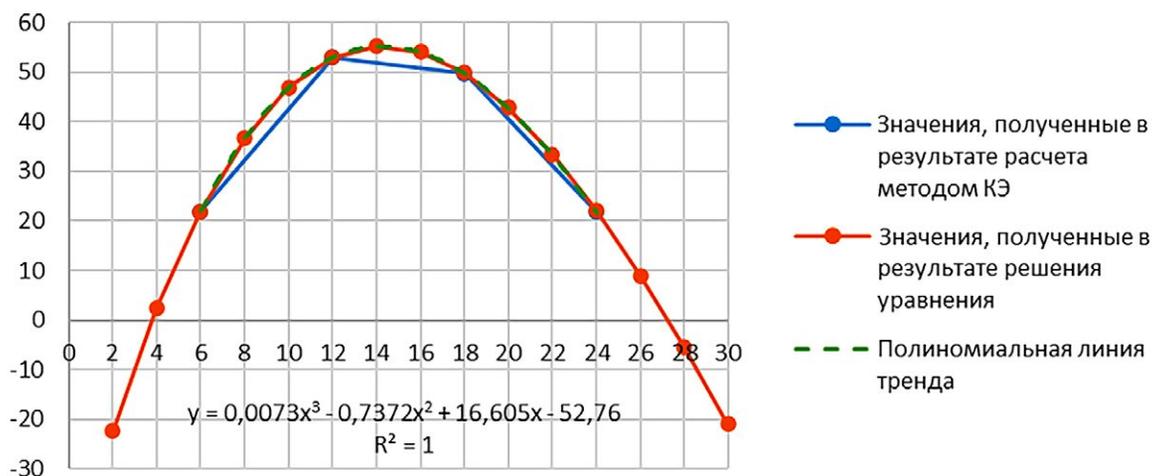
### Зависимость касательных напряжений на внешней опоре от высоты витка



**Рис. 13.** График зависимости касательных напряжений на внешней опоре от высоты витка (по горизонтали)

**Fig. 13.** Graph of dependence of tangential stresses at the external support on the height of the coil (horizontally)

### Зависимость касательных напряжений на внутренней опоре от высоты витка



**Рис. 14.** График зависимости касательных напряжений на внутренней опоре от высоты витка (по горизонтали)

**Fig. 14.** Graph of dependence of tangential stresses on the inner support on the height of the coil (horizontally)

Графики касательных напряжений описываются кубической параболой с точками экстремума 14 м (22,3%), а парабола, описывающая напряжения на внешней опоре, имеет восходящие ветви, на внутренней – нисходящие. Данные результаты позволяют сделать вывод о равнозначности значения касательных напряжений в точках 12 и 16 м (19,1 и 25,5%), 10 и 18 м (15,9 и 28,6%).

Таким образом, для проектирования конструктивных решений ТПУ «Гатчина» приняты наиболее оптимальные значения перепада высот в интервале 7–18 м (11,14–28,6%).

### **ПИТАЮЩАЯ ВЛ 330 КВ «ПЕВЕК-БИЛИБИНО-ЧЕРСКИЙ»**

В настоящее время продолжается строительство электростанции у арктического порта Певек, которая включает плавучую атомную теплоэлектростанцию (ПАТЭС) «Академик Ломоносов», предназначенную для тепло- и энергоснабжения отдаленных арктических прибрежных территорий. В номинальном режиме ПАТЭС способна обеспечить выдачу в береговые сети 60 МВт электроэнергии и до 50 Гкал/ч тепловой энергии для нагрева теплофикационной воды. В случае максимальной выдачи тепловой мощности (приблизительно 145 Гкал/ч), электрическая мощность, подаваемая в береговую сеть, снижается до 30 МВт. ПАТЭС способна обеспечивать электроэнергией населенный пункт с численностью до 100 000 чел. [27, 28], а также быть дополнительным источником электроэнергии для АТЭМ.

Общая протяженность ВЛ 330 кВ от порта Певек до пос. Черский составляет 754 км, причем длина первого участка от Певека до пос. Быстрый – 114 км (см. Рис. 3). Линия электропередачи подключается к АТЭМ через специализированные электрические подстанции с закрытыми распределительными устройствами.

Трасса ВЛ характеризуется весьма жесткими природно-климатическими условиями и тяжелыми для строительства горными условиями. Для одноцепной ВЛ 330 кВ приняты многогранные стальные опоры П-образного типа, которые благодаря своей аэродинамической конструктивной форме и отсутствию решетчатых элементов, характеризуются меньшими ветровыми и гололедными нагрузками по сравнению с решетчатыми опорами, что весьма актуально для жестких условий Севера Чукотки с сильными ветрами [26]. Кроме того, в связи со значительно меньшим количеством болтовых соединений такие опоры отличаются пониженными трудозатратами при сборке и установке.

Монтаж опоры в рабочее положение осуществляется путем фланцевого соединения с фундаментом. В качестве фундамента применяется труба с ответным фланцем.

Принят современный компактированный провод GZTASR 600, который, благодаря своему высокому разрывному усилию и низкому электрическому сопротивлению, является превосходным выбором для арктических условий. Высокая механическая прочность особенно важна для несения значительных гололедных и ветровых нагрузок. Кроме того, устойчивость к низким температурам и коррозионная стойкость делают его идеальным для долгосрочной эксплуатации в условиях Арктики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По предварительным технико-экономическим расчетам продолжительность доставки грузов по Арктической скоростной магистрали от Усть-Луги до Берингова пролива по сравнению с Северным морским путем сокращается в 5,5 раза, а пассажиров – почти в 30 раз, но при этом протяженность проектируемой скоростной магистрали почти в 1,6 раза больше в связи с необходимостью обхода высоких прибрежных горных массивов, особенно в шельфе Восточно-Сибирского моря.

Предложен новый вариант Арктической транспортно-энергетической магистрали, соединяющей ключевые арктические порты на российском побережье Северного Ледовитого океана и дополнительно обеспечивающей безопасность персонала ледокольного флота Северного Морского Пути.

По предварительным расчётам расход стали составит 37,78 т на пог. м магистрали для наиболее экономичного варианта несущей конструкции пролетного строения при использовании отечественного компактированного провода GZTASR600 и треугольной решетки расположения связей на синусообразных арках. Стоимость такой конструкции предварительно составит около 4,2 млн. руб. за пог. м протяженности транспортно-энергетической магистрали.

Использование сталежелезобетона в качестве материала несущих конструкций позволит более экономично проектировать сечения конструкции транспортно-пересадочных узлов.

На основе анализа зависимости нормальных и касательных напряжений от транспортных нагрузок и продольного уклона, выявлены оптимальные значения продольного уклона пандуса транспортно-пересадочных узлов, составляющие 11,14–28,6%.

В последующих исследованиях следует рассмотреть возможность сокращения единиц ТПУ за счет прокладки тоннелей сквозь горы, а также подводного прохождения транспортно-энергетической магистрали.

**Авторы заявляют, что:**

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

**The authors state that:**

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайцев А.А. Социализация общественного транспорта в новом технологическом укладе // Транспортные системы и технологии. 2019. Т. 5, № 3. С. 4–17. doi: 10/17816/transsyst2019534-17
2. Международная конференция «Трансконтинентальная магистраль Евразия-Америка через Берингов пролив». Forum International. 2007. № 7. Дата обращения: 30.10.2022. Режим доступа: [https://larouchepub.com/eiw/public/2007/2007\\_20-29/2007-24/pdf/forum\\_7.pdf](https://larouchepub.com/eiw/public/2007/2007_20-29/2007-24/pdf/forum_7.pdf)
3. РАН предложила Путину проект железной дороги через Сибирь // Газета «Взгляд». 23.03.2015. Дата обращения: 30.10.2022. Режим доступа: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=137215>
4. Сенькин Н.А., Андреев Д.М., Васильев В.С. Предложения по созданию высокоскоростных транспортных магистралей в Арктической зоне: конструкции и технологии // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9, № 1. С. 44–63. doi: 10.17816/transsyst20239144-63
5. Зайцев А.А. Инновации как способ решения глобальных задач // РЖД-Партнер. 2018. № 13–14. С. 35. Дата обращения: 30.10.2022. Режим доступа: <https://flotprom.ru/%D0%E6%E4%EF%E0%F0%F2%ED%E5%F0%C6%F3%F0%ED%E0%EB/>
6. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
7. Лаппо Г.М. Города России. Взгляд географа. М.: Новый хронограф, 2012.
8. Медведев Н.Е. Варианты конструктивных решений надземных сооружений высоко- и сверхскоростной транспортной систем. В кн.: Актуальные проблемы строительства. Материалы 70-й Всероссийской научно-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Санкт-Петербургского госуд. архитектурно-строительного ун-та. Ч.1. СПбГАСУ. СПб, 2017. С. 240–244. Дата обращения: 30.10.2022. Режим доступа: <https://www.spbgasu.ru/science/sborniki-trudov-konferentsiy-spbgasu-i-monografii/sborniki-trudov-konferentsiy-i-monografii-za-2017-g/>
9. Якуненкова М.С. Транспортный хаб как тип общественного комплекса. Функциональные элементы транспортного хаба. В кн.: Архитектура –

- строительство – транспорт: материалы 72-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. Ч. 1. СПбГАСУ. СПб, 2019. С. 185–189. EDN: YOIEYZ
10. Андреев Д.М., Большихшапок И.С. Предложения по строительству эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали от Гатчины до Санкт-Петербурга. В кн.: Магистратура – транспортной отрасли. Материалы VI Всероссийской межвузовской конференции «Магистерские слушания». 21–22 октября 2021 г. СПбГАСУ. СПб, 2022. С. 9–22. EDN: RZPSCN
  11. Вакуленко С.П., Евреенова Н.Ю. Техническое оснащение и технология работы транспортно-пересадочных узлов, формируемых с участием железнодорожного транспорта. М.: МИИТ, 2015.
  12. Terentyev Yu.A., Filimonov V.V., Malinetskiy G.G., et al. Russia Integrated Transit Transport System (ITTS) Based on Vacuum Magnetic Levitation Transport (VMLT). *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(3):57–84. doi: 10.17816/transsyst201843s157-84
  13. Kim K.K. The Russian Version of the Transport System “Hyperloop”. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):73–91. doi: 10.17816/transsyst20184273-91
  14. Musk E. Hyperloop Alpha. Texas: SpaceX [cited 2019 July 28]. Available from: [https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop\\_alpha-20130812.pdf](https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf)
  15. Федорова М.В. Скоростной городской транспорт для современной агломерации // *Транспортные системы и технологии*. 2015. Т. 1, № 1. С. 26–36. doi: 10.17816/transsyst20151126-36
  16. Талашкин Г.Н. Особенности проектирования и строительства Маглев-дорог для грузовых перевозок // *Транспортные системы и технологии*. 2016. Т. 2, № 2. С. 53–56. doi: 10.17816/transsyst20162253-56
  17. Patent USA US5950543 (A). Oster D. inventor. Evacuated tube transport. 1999 Sept. 14. Available from: <https://patents.google.com/patent/US5950543A/en>
  18. Постановление правительства Санкт-Петербурга от 30 июня 2014 года N 552 “О государственной программе Санкт-Петербурга «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга». Дата обращения: 20.07.2023. Режим доступа: [https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c\\_transport/gosudarstvennaya-programma-sankt-peterburga-razvitie-transportnoj-sist/](https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/gosudarstvennaya-programma-sankt-peterburga-razvitie-transportnoj-sist/)
  19. Комитет по развитию транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга. «Концепция развития транспортной системы Санкт-Петербурга». Дата обращения: 20.07.2023. Режим доступа: <https://krti.gov.spb.ru/dorozhnyj-kompleks/konceptsiya-razvitiyatransportnoj-sistemy-sankt-peterburga/>
  20. Плешко М.С., Павленко Д.Г., Абдулманафов Г.Б., Кешабян Р.В. Перспективы развития мирового тоннелестроения и транспортного строительства // *Теория и практика современной науки*. 2018. №1(31). С. 406–408. Дата обращения: 20.07.2023. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-mirovogo-tonnelestroeniya-i-transportnogo-stroitelstva>
  21. Mahmoodzadeh A., Mohammadi M., Daraei A., et al. Forecasting tunnel geology, construction time and costs using machine learning methods // *Neural Comput & Applic*. 2021. Vol. 33. P. 321–348. doi: 10.1007/s00521-020-05006-2

22. Cheng R., Chen W., Hao H., Li J. A state-of-the-art review of road tunnel subjected to blast loads // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. [cited 20.07.2023]. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103911>
23. Yu G., Wang Y., Mao Z., et al. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating // *Trenchless Technology Research*. 2021. doi: 10.1016/j.tust.2021.104125
24. Особенности проектирования и строительства в арктическом регионе. Дата обращения: 15.11.2023. Режим доступа: [http://zvt.abok.ru/articles/521/Osobennosti\\_proektirovaniya\\_i\\_stroitelstva\\_v\\_arkticheskom\\_regionе?ysclid=lp3xz2mf6d433667185](http://zvt.abok.ru/articles/521/Osobennosti_proektirovaniya_i_stroitelstva_v_arkticheskom_regionе?ysclid=lp3xz2mf6d433667185)
25. Строительство в высоких широтах. Принципы, возможности и перспективы. Дата обращения: 05.01.2024. Режим доступа: <https://ardexpert.ru/article/5072>
26. Азаренкова З.В. Планировочная организация транспортно-пересадочных узлов // *Academia. Архитектура и строительство*. 2011. № 1. С.76–80. EDN: OOEUOX
27. Безверхая Е.П., Скопинцев А.В. Функционально-типологические модели в архитектуре интермодальных транспортно-пересадочных узлов // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2019. №3(48). С. 135–147 Дата обращения: 05.01.2024. Режим доступа: [https://marhi.ru/AMIT/2019/3kvart19/PDF/10\\_bezverhaja.pdf](https://marhi.ru/AMIT/2019/3kvart19/PDF/10_bezverhaja.pdf)
28. Власов Д.Н. Методика формирования системы транспортно-пересадочных узлов в пригородной зоне агломерации // *Вестник евразийской науки*. 2013. № 4 (17). С. 1–10. Дата обращения: 05.01.2024. Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/metodika-forirovaniya-sistemy-transportno-peresadochnyh-uzlov-v-prigorodnoy-zone-aglomeratsii.pdf>

## REFERENCES

1. Zaitsev AA. Socialization of public transport in the new technological mode. *Transport systems and technologies*. 2019;5(3):4–17. (In Russ.) doi: 10/17816/transsyst2019534-17
2. International Conference “Intercontinental Eurasia-America Transport Link via Bering Strait”. *Forum International*. 2007;(7):1–80. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: [https://larouchepub.com/eiw/public/2007/2007\\_20-29/2007-24/pdf/forum\\_7.pdf](https://larouchepub.com/eiw/public/2007/2007_20-29/2007-24/pdf/forum_7.pdf)
3. RAS offered Putin the project of a railroad through Siberia. *Vzglyad newspaper*. 23.03.2015 (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=137215>
4. Senkin NA, Andreev DM, Vasiliev VS. Proposals for the creation of high-speed transport highways in the Arctic zone: designs and technologies. *Innovative transport systems and technologies*. 2023;9(1):44–63. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst20239144-63
5. Zaitsev AA. Innovatsii kak sposob reshenia globalnykh zadach. *RZD-PARTNER*. 2018;13-14:35. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: <https://flotprom.ru/%D0%E6%E4%EF%E0%F0%F2%ED%E5%F0%C6%F3%F0%ED%E0%EB/>

6. Antonov YuF, Zaitsev AA. *Magnitolevitatsionnaia transportnaia tekhnologiia*. Moscow: FIZMATLIT; 2014. (In Russ.)
7. Lappo GM. *Goroda Rossii. Vzglyad geografa*. Moscow: Novyj hronograf; 2012. (In Russ.)
8. Medvedev NE. Varianty konstruktivnyh reshenij nadzemnyh sooruzhenij vysokoi sverhskorostnoj transportnoj system. In “Aktual’nye problemy stroitel’sstva” *Materialy 70-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh* St. Petersburg: GASU; 2017:240–244 (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: <https://www.spbgasu.ru/science/sborniki-trudov-konferentsiy-spbgasu-i-monografii/sborniki-trudov-konferentsiy-i-monografii-za-2017-g/>
9. Yakunenkova MS. Transportnyj hab kak tip obshchestvennogo kompleksa. In: *Funkcional’nye elementy transportnogo haba. In Aktual’nye problemy stroitel’sstva. Materialy 72-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh* St-Petersburg: GASU; 2019;185–189 (In Russ.) EDN: YOIEYZ
10. Andreev DM, Bolshikhshapok IS. Proposal for the construction of overpass and transportation hubs of the high-speed railway from Gatchina to Saint Petersburg. In: *Magistratura – transportnoy otrasly. Materialy VI-j Vserossijskoj mezvuz. konf. Magistr. Slushania*. St. Petersburg: GASU; 2022:9–22 (In Russ.)]. EDN: RZPSCN
11. Vakulenko SP, Evreenova NYu. Tekhnicheskoe osnashchenie i tekhnologiya raboty transportno-peresadochnykh uzlov, formiruemykh s uchastiem zheleznodorozhnogo transporta: Uchebnoe posobie. Moscow: MIIT; 2015. (In Russ.)
12. Terentyev YuA, Filimonov VV, Malinetskiy GG, et al. Russia Integrated Transit Transport System (ITTS) Basid on Vacuum Magnetic Levitation Transport (VMLT). *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(3):57–84. doi: 10.17816/transsyst201843s157-84
13. Kim KK. The Russian Version of the Transport System “Hyperloop”. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):73–91. doi: 10.17816/transsyst20184273-91
14. Musk E. *Huperloop Alpha*. Texas: SpaceX [cited 2019 July 28]. Available from: [https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop\\_alpha-20130812.pdf](https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf)
15. Fedorova MV. Speed urban transport for modern agglomeration. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(1):26–36. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst20151126-36
16. Talashkin GN. Features of design and construction Maglev-road to freight. *Transportation systems and technology*. 2016;2(2):53–56. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst20162253-56
17. Patent USA US5950543 (A). Oster D., inventor. Evacuated tube transport. 1999 Sept. 14. Available from: <https://patents.google.com/patent/US5950543A/en>
18. Postanovlenie pravitel’stva Sankt-Peterburga ot 30 iyunya 2014 goda N 552 “O gosudarstvennoj programme Sankt-Peterburga “Razvitie transportnoj sistemy Sankt-Peterburga”. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: [https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c\\_transport/gosudarstvennaya-programma-sankt-peterburga-razvitie-transportnoj-sist/](https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/gosudarstvennaya-programma-sankt-peterburga-razvitie-transportnoj-sist/)

19. Komitet po razvitiyu transportnoj infrastruktury Sankt-Peterburga. “Konceptsiya razvitiya transportnoj sistemy Sankt-Peterburga”. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: <https://krti.gov.spb.ru/dorozhnyj-kompleks/konceptsiya-razvitiyatransportnoj-sistemy-sankt-peterburga/>
20. Pleshko MS, Pavlenko DG, Abdulmanafov GB, Keshabyan RV. Prospects for the development of global tunneling and transport. *Theory and practice of modern science*. 2018;1(31):406–408. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-mirovogo-tonnelestroeniya-i-transportnogo-stroitelstva>
21. Mahmoodzadeh A, Mohammadi M, Daraei A, et al. Forecasting tunnel geology, construction time and costs using machine learning methods. *Neural Comput & Applic*. 2021;33:321–348. doi: 10.1007/s00521-020-05006-2
22. Cheng R, Chen W, Hao H, Li J. A state-of-the-art review of road tunnel subjected to blast loads. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. doi: 10.1016/j.tust.2021.103911
23. Yu G, Wang Y, Mao Z, et al. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating. *Trenchless Technology Research*. YK; 2021. doi: 10.1016/j.tust.2021.104125
24. Features of design and construction in the Arctic region. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: [http://zvt.abok.ru/articles/521/Osobennosti\\_proektirovaniya\\_i-stroitelstva\\_v\\_arkticheskom\\_regione?ysclid=lp3xz2mf6d433667185](http://zvt.abok.ru/articles/521/Osobennosti_proektirovaniya_i-stroitelstva_v_arkticheskom_regione?ysclid=lp3xz2mf6d433667185)
25. Building in high latitudes. Principles, opportunities and perspectives. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: <https://ardexpert.ru/article/5072>
26. Azarenkova ZV. Planning organization of transport hubs. *Academia. Architecture and construction*. 2011;1:76–80 (In Russ.) EDN: OOEUOX
27. Bezverkhaya EP, Skopintsev AV. Functional and typological models in the architecture of intermodal transport hubs. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2019;3(48):135-147 (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: [https://marhi.ru/AMIT/2019/3kvart19/PDF/10\\_bezverhaja.pdf](https://marhi.ru/AMIT/2019/3kvart19/PDF/10_bezverhaja.pdf)
28. Vlasov DN. Methodology for forming a system of transport hubs in a suburban agglomeration zone. *Bulletin of Eurasian Science*. 2013;4(17):1–10. (In Russ.) [cited 05.01.2024]. Available from: <https://naukovedenie.ru/metodika-forirovaniya-sistemy-transportno-peresadochnyh-uzlov-v-prigorodnoy-zone-aglomeratsii.pdf>

#### Сведения об авторах:

**Сенькин Николай Александрович**, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 1344-9412; ORCID: 0000-0002-7086-1960

E-mail: senkin1952@yandex.ru

**Закарлюкина Виктория Михайловна**, бакалавр;

eLibrary SPIN: 8343-7785; ORCID: 0009-0002-6307-7155

E-mail: vikto.0152@gmail.com

**Давидюк Эвелина Витальевна**, бакалавр;

ORCID: 0009-0002-2290-7300

E-mail: evellinav17@gmail.com

**Ли Павел Андреевич**, бакалавр;

ORCID: 0009-0004-5730-8038

E-mail: leeprav@mail.ru

**Большихшапок Иван Сергеевич**, магистр;

eLibrary SPIN: 2663-7758; ORCID: 0000-0001-6868-4312

E-mail: i.bshapok@yandex.ru

**Information about authors:**

**Nikolai A. Senkin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

eLibrary SPIN: 1344-9412; ORCID: 0000-0002-7086-1960

E-mail: senkin1952@yandex.ru

**Victoria M. Zakarlyukina**, Bachelor of Science.

eLibrary SPIN: 8343-7785; ORCID: 0009-0002-6307-7155

E-mail: vikto.0152@gmail.com

**Evelina V. Davidyuk**, Bachelor of Science;

ORCID: 0009-0002-2290-7300

E-mail: evellinav17@gmail.com

**Pavel Andreevich Li**, Bachelor of Science;

ORCID: 0009-0004-5730-8038

E-mail: leeprav@mail.ru

**Ivan S. Bolshikhshapok**, Master of Science;

eLibrary SPIN: 2663-7758; ORCID: 0000-0001-6868-4312

E-mail: i.bshapok@yandex.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

<https://doi.org/10.17816/transsyst626637>

© **И.В. Демьянович**

Дальневосточный государственный университет путей сообщения  
(Хабаровск, Россия)

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПУТЕВЫХ МАШИННЫХ СТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ БАМ

**Обоснование.** В статье рассмотрены особенности выполнения плана капитального строительства силами путевой машинной станции на участке Байкало-Амурской магистрали (БАМ). Содержание научной проблемы состоит в оценке эффективного использования труда в условиях Крайнего Севера. Особое внимание уделено расчету численности и экономии эксплуатационных расходов. Кроме того, актуально изучение повышения уровня механизации ручного труда для демонтажа деревянной рельсошпальной решетки.

**Цель.** Аналитическая оценка показателей плана по труду путевой машинной станции, ведущей работы в зоне БАМ.

**Методы.** Данными для исследования являются аналитические отчеты о деятельности предприятий путевого хозяйства. Исследование построено на использовании традиционных методов экономического анализа и технико-экономического метода планирования показателей деятельности предприятия.

**Результаты.** Проанализирована динамика численности работников ПМС в период роста объемов строительства железнодорожных путей в зоне БАМ; предлагаются варианты повышения экономической эффективности от снижения потерь рабочего времени и оптимизации технических процессов.

**Заключение.** Даны рекомендации реализации мероприятий по эффективному использованию трудовых ресурсов, повышению профессионализма и минимизации текучести кадров. Проведенные расчеты показали, что правильные инновационные решения сложных организационно-управленческих проблем позволяют снижать эксплуатационные расходы.

**Ключевые слова:** БАМ; путевая машинная станция; объемы работ; трудовые ресурсы; текучесть кадров.

### Как цитировать:

Демьянович И.В. Повышение эффективности работы путевых машинных станций // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 274–286. doi: 10.17816/transsyst626637

## Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport

## Section 3. TRANSPORTATION ECONOMICS

© **I.V. Demyanovich**

Far Eastern State Transport University

(Khabarovsk, Russia)

### IMPROVING THE EFFICIENCY OF TRACK MACHINE STATIONS IN BAM CONDITIONS

**Background.** The article examines the specifics of implementing a capital construction plan by the track engine station on the Baikal–Amur mainline (BAM) section. The scientific problem focuses on assessing the effective use of labor in the challenging conditions of the Far North. Special attention is paid to calculating the number of workers needed and the potential savings in operating costs. A key aspect is the study of increasing mechanization levels for manual tasks, such as dismantling wooden rail gratings.

**Aim.** The aim of this study is to provide an analytical assessment of the labor plan indicators for the track machine station operating in the BAM zone.

**Methods.** Data for this study were sourced from analytical reports on the activities of the travel company. The research employed traditional economic analysis methods and the techno-economic method of planning enterprise performance indicators.

**Results.** The study analyzed the dynamics of the number of track engine station employees during the period of increased railway construction in the BAM zone. It proposed options for increasing economic efficiency by reducing working time losses and optimizing technical processes.

**Conclusion.** The article offers recommendations for effectively utilizing labor resources, improving worker professionalism and minimizing staff turnover. Calculations demonstrate that innovative solutions to complex organizational and management problems can reduce operating costs.

**Keywords:** BAM; track machine station; volume of work; human resources; staff turnover.

#### To cite this article:

Demyanovich IV. Improving the efficiency of track machine stations in BAM conditions. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(2):274–286. doi: 10.17816/transsyst626637

## ВВЕДЕНИЕ

С целью увеличения пропускной и провозной способности БАМа в Российской Федерации реализуется государственный инвестиционный проект по модернизации железнодорожной инфраструктуры поэтапно [1]. Объемы 2-го этапа включают строительство более 1300 км новых железных дорог [2]. Основная нагрузка на выполнение задач по их строительству возлагается на путевые машинные станции (далее – ПМС), которые являются региональным структурным подразделением дирекции по ремонту пути структурного подразделения Центральной дирекции по ремонту пути – филиала ОАО «РЖД».

Виды работ ПМС разнообразны – это реконструкция верхнего строения пути, все виды капитального ремонта, строительство нового пути. В зимний период ПМС, с учетом климатических условий, продолжают путевые работы, а на остальных дорогах очищают территории станций и узлов от снега, организуют звеносборочные и промежуточные щебеночные базы, привозят и выгружают материалы верхнего строения и собирают звенья пути. Кроме того, ПМС переустраивают станции, укладывают новые и удлиняют существующие станционные пути, производят сборку путевой решетки из новых материалов верхнего строения на звеносборочных базах, ремонтируют старогодные рельсошпальные решетки, заменяют рельсы и промежуточные скрепления [3].

Основными предприятиями в зоне БАМ являются ПМС на станциях Могот (обслуживает Малый БАМ) и Новый Ургал [4]. Специфика работы определяет требования к эффективному использованию предоставляемых в графике движения поездов «окон» в целях снижения потерь, возникающих из-за задержек поездов, на основе внедрения прогрессивных технологических процессов и наилучшего использования машин и механизмов, соответствующих технологиям «бережливого производства».

Объектом исследования выступит ПМС, которая в зоне обслуживания БАМ является одним из градообразующих предприятий со средним количеством рабочих мест до 400.

## СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПУТЕВОЙ МАШИНОЙ СТАНЦИИ

Все показатели экономической деятельности формируют систему целевых показателей путевого хозяйства в целом [5]. Основным документом, направляющим и организующим всю хозяйственную деятельность

предприятия, является годовой производственно-финансовый план.

Исходные данные, определяющие производственную программу предприятия, следующие:

- производственная мощность ПМС (наличие комплексов путевых машин и механизмов, трудовых ресурсов и т.п.);
- наличие и мощность путевой производственной базы;
- отдаленность ПМС от участка производства ремонтных работ;
- количество километров пути, подлежащих ремонту;
- наличие проектно-сметной документации на путевые работы;
- размер и периодичность предоставляемых для производства работ «окон»;
- обеспеченность материалами верхнего строения пути;
- период производства предстоящих работ.

План ремонтного производства предприятия устанавливается на год с разбивкой по кварталам в натуральном, условно-натуральном и денежном выражении в целом и по видам ремонта и работ. Пример программы плановых объемов работ представлен в Табл. 1.

**Таблица 1.** Плановые объемы работ ПМС

**Table 1.** Planned volumes of Track engine station work

Наименование работ	Объем работ
Укладка РШР (капитальное строительство)	102 км
Укладка плетей	65 км
Монтаж новой РШР	86 км
Монтаж и укладка стрелочных переводов	70 комплектов
Демонтаж старогоней деревянной РШР	41,5 км
Завоз щебеночной продукции	432 тыс. м <sup>3</sup>
Сварка стыков алюминотермитным способом	93 стыка

При планировании и оценке деятельности ПМС основой для расчета объема ремонта в денежном выражении служит сметная стоимость ремонтных работ, на каждый вид работы также составляется калькуляция.

По плану капитальных работ предусматривают расходы на капитальный, средний, подъемочный ремонты пути, капитальный ремонт искусственных сооружений, переездов на основании норм межремонтного тоннажа и сметной стоимости, которые осуществляются за счет амортизационных отчислений от стоимости основных фондов.

Нормы амортизационных отчислений по видам основных фондов установлены отдельно на капитальный ремонт (частичное восстановление основных фондов) и на полное восстановление фондов (капитальные вложения).

Объем работ в «приведенных километрах» рассчитывают с учетом относительной трудоемкости различных путевых работ. За приведенную единицу принят 1 км капитального ремонта пути на железобетонных шпалах и щебеночном балласте. Для выражения различных путевых работ в приведенных километрах применяют специальные коэффициенты.

Основные показатели плана по труду путевой машинной станции: лимит численности работников, производительность труда, фонд заработной платы, задание по сокращению ручного труда при производстве работ.

Исходными данными для расчета численности работников по плану труда являются: программа путевых ремонтных работ, их структура по видам работ; уровень производительности труда; расчетный уровень трудовых затрат, заложенный в сметной стоимости ремонта 1 км пути, по видам ремонта.

Основную часть контингента путевой машинной станции составляют работники, занятые на капитальных путевых работах, которые представляют собой основной вид производственной деятельности. Численность этих работников рассчитывают по достигнутому уровню производительности труда в предыдущем году и заданию по повышению производительности труда. Потребность в персонале на других видах работ (слесарные работы, пуско-наладочные, строительно-монтажные работы и т.п.) определяют по объему работ и объектам обслуживания в соответствии с действующими нормами.

Ведущие профессии предприятия: монтер пути, машинист железнодорожно-строительной машины (далее машинист ЖДСМ), помощник железнодорожно-строительной машины (далее – помощник ЖДСМ); бригадир (освобожденный) по текущему ремонту и обслуживанию пути (далее – бригадир), мастер дорожный. Анализ штатной численности представлен в Табл. 2.

В настоящее время наблюдается рост численности монтеров пути, что связано с ростом объемов работ по новому строительству железнодорожных путей в зоне БАМ (по линии Бам-Тында и Тында-Беркакит) для увеличения пропускной способности участков. С одной стороны, в настоящее время на БАМе работает уже третье поколение

**Таблица 2.** Численность ведущих профессий ПМС**Table 2.** The number of leading professions Track engine station

Показатель	Характеристика профессии	Год		
		2021	2022	2023
Штатная численность рабочих, всего	По штатному расписанию	179	225	417
Машинист ЖДСМ	Управляет специальной строительной техникой при ремонте, модернизации и текущем содержании пути. Должен уметь обслуживать и диагностировать технику.	23	23	25
Помощник ЖДСМ	Обеспечивает поддержку и содействие в работе машиниста.	9	9	9
Бригадир (освобожденный) по текущему содержанию и ремонту пути и искусственных сооружений	Обеспечивает организацию и контроль за работами по текущему содержанию и ремонту пути и ИССО	6	8	13
Монтер пути	Выполняет работы по замене рельсов и шпал, обточке рельсов, выправке шпал и др.	70	103	274
Прочие	Составитель поездов, машинист крана (крановщик), сигналист, распределитель работ, оператор ЭВМ, водитель автомобиля, водитель погрузчика, машинист бульдозера, машинист автогрейдера, тракторист, электромонтер, электрогазосварщик и другие профессии	71	82	96

железнодорожных династий из числа первостроителей. С другой стороны, согласно прогнозам, до 2025 г. потребности в кадрах для экономики Хабаровского края по транспортной отрасли ежегодно будут возрастать на 16,2% [6].

Из приведенных в Табл. 3 данных видно, что с увеличением штатной численности укомплектованность кадров снизилась. Так как показатель 2023 г. – плановый, то оценивать его нецелесообразно. Укомплектованность в 2022 г. снизилась на 0,7% по отношению к аналогичному периоду 2021 г. Текучесть кадров в 2022 г. замедлилась на 6,5%, значит количество

**Таблица 3.** Анализ динамики трудовых показателей**Table 3.** Analysis of the dynamics of labor indicators

Показатель	Год		
	2021	2022	2023 прогноз
Объем работ, приведенные, км	129,05	168,71	347,02
Среднесписочная численность, чел.	185	208	412
Укомплектованность, %	99,5	98,8	99,5
Текучесть кадров, %	12,4	5,9	5
Производительность труда, приведенные, км /чел.	0,698	0,811	0,842
Темп роста производительности труда, %	109,2	116	103,8
Темп роста средней заработной платы, %	108,3	114,2	102,1

увольнений по собственному желанию уменьшилось на 47,5%. В работе [7] определены причины текучести кадров, характерные для предприятий путевого хозяйства.

Проблема сложности укомплектования штатных должностей и текучести кадров решается благодаря привлечению иностранной рабочей силы [8], что обуславливается региональными особенностями на рынке труда [9]. Иностранцы принимаются на должность монтера пути на период выполнения основного объема работ с апреля по октябрь, что учитывается в штатном расписании и позволяет избежать высокой текучести кадров, и некомплектованности штатных должностей. Также в работе [10] указывается такая проблема, как «слабая сторона» в деятельности предприятия путевого хозяйства Дальневосточной железной дороги.

Для осуществления социальной политики в ОАО «РЖД» разработана система мотивации труда [11] и закрепления кадров, проводится постоянная, целенаправленная работа по повышению его производительности.

Производительность труда работников определяют в приведенных километрах выполненного капитального ремонта, приходящихся на одного работника. Планирование производительности труда осуществляется с учетом опережающего роста над ростом заработной платы [12].

Фонд заработной платы рассчитывают исходя из фактической средней заработной платы одного работника с учетом принимаемого на год темпа ее роста и планируемой численности работников. Например, у монтера пути за месяц в 2023 г. она составляет 70 400,62 рублей.

Для обеспечения функционирования и поддержания конкурентоспособности предприятия на рынке труда постоянно проводится анализ заработной платы предприятия и предприятий конкурентов, что позволяет удерживать работников за счет достойной заработной платы.

## ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Спецификой предприятий путевого хозяйства в зоне БАМа, а именно Верхнебуреинского района Хабаровского края, являются следующие важные моменты:

- высокая конкуренция среди предприятий за трудовые ресурсы на региональном рынке труда и влияние демографической ситуации;
- разъездной характер работы для большинства рабочих профессий;
- работа в выходные дни;
- сложные климатические условия (работа на открытом воздухе), так как ПМС находятся на территории, приравненной к районам Крайнего Севера, где зимой температура достигает минус 50°C соответственно, важно создавать хорошие условия труда;
- значительное увеличение объемов работ.

С одной стороны, эффективность использования фонда оплаты труда подразумевает продуктивную работу коллектива, что невозможно без квалифицированного персонала, ориентированного на результат и рост производительности труда [13]. С другой стороны, ее можно повысить за счет экономических и инновационных мероприятий по следующим направлениям:

- снижения потерь рабочего времени;
- оптимизации технических процессов.
- 

### 1. Снижение потерь рабочего времени.

Для выявления потерь рабочего времени специалистами экономического отдела предприятия проводятся фотографии рабочего дня, анализ очевидных проблем, возникающих в работе, что позволяет определить вектор развития предприятия, в том числе, для более эффективного использования рабочей силы.

Например, ПМС занимается сборкой новой рельсошпальной решетки. Установлен план объема работ – 86 км, но мощности производственной базы не позволяют складировать рельсошпальную решетку (далее – РШР) в одном месте. Появилась необходимость складирования РШР

на значительном удалении от привычных мест и вывоза на участки, где, непосредственно, будет осуществлена ее укладка. Данный факт способствовал увеличению потерь рабочего времени машинистов крана, связанному со следующими причинами:

- машинист крана осуществляет свою деятельность на козловом кране (КПБ-10), движение крана ограничено длиной питающего кабеля;
- в связи с увеличением расстояния при складировании звеньев рельсошпальной решетки длины крана недостаточно, необходимо производить переключение.

Решение данной проблемы требует инновационного подхода, а именно, увеличения троллейной линии, исключающего переключение. Данный опыт успешно применяется в других ПМС.

Эффект от внедрения новой троллейной линии составит 378,70 тыс. рублей в год (расчет экономического эффекта представлен в Табл. 4).

## 2. Оптимизация технических процессов.

Оптимизация технических процессов является сложной задачей, цель которой получение оптимального режима, позволяющего получить максимальный выход продукта при высоких качественных показателях и его минимальной себестоимости.

Например, демонтаж деревянной рельсошпальной решетки осуществляется ручным способом. Для повышения уровня механизации и автоматизации процессов данного демонтажа требуется установка и применение автоматической звеноразборочной линии [14]. Экономический эффект составит 4224,04 тыс. рублей (расчет экономического эффекта представлен в Табл. 5).

**Таблица 4.** Расчет экономического эффекта

**Table 4.** Calculation of the economic effect

Переключение, ч	Кол-во переключений в день	Потери рабочего времени, ч	Зарботная плата 1 ч машиниста крана, руб.	Всего потери в день, руб.	Рабочих дней в году	Потери в год, тыс. руб.
0,08	36	2,88	532,36	1533,20	247	378,70

**Таблица 5.** Расчет экономического эффекта**Table 5.** Calculation of the economic effect

Наименование работ	Ед. изм.	Трудо-затраты на ед., чел.-ч	Объем, зв.	Трудозатраты на объем, чел.-ч	Фонд рабочего времени, ч	Расчетная численность $Ч_{\text{яв}}$ , чел.	$K_{\text{зам}}$	Расчетная численность, $Ч_{\text{сп}}$ , чел.
Демонтаж ручным способом								
Демонтаж ДО РШР (н.в.1.182)	зв	8,20	1 640	13448	1973	7	1,16	8
Демонтаж на автоматической звеноразборочной линии								
Демонтаж ДО РШР (н.в.2.1.243)	зв	2,6	1 640	4264	1973	2	1,16	3
Снижение численности монтеров пути								5

В результате мероприятий получен экономический эффект в виде:

- сокращения численности на участке демонтажа деревянной РШР – 5 чел;
- снижения расходов на заработную плату – 4224,04 млн. руб.

Экономический эффект от двух предложенных вариантов составит 4602,7 тыс. руб. в год, высвободившиеся денежные средства можно перенаправить на дополнительное премирование работников за перевыполнение планов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования показали, что рост объемов выполненных путевых работ требует реализации мероприятий по эффективному использованию трудовых ресурсов в рамках конкретного железнодорожного предприятия, а именно, совершенствования подбора и расстановки кадров, рационального использования как ручного, так и механизированного труда, повышения профессионализма и минимизации текучести кадров. В результате проведенных расчетов было определено, что правильные инновационные решения сложных организационно-управленческих проблем позволяют снижать эксплуатационные расходы.

**Авторы заявляют что:**

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

**The authors state that:**

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап). Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2021 №1100-р. Дата обращения: 05.02.2024. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/DmnOwIKcEzTEENtaA3snyn22AHdSVbJy.pdf>
2. Макушин М.А., Бобровский Р.О., Демидова К.В. и др. Социально-экономическое развитие территорий в зоне влияния БАМ: советские планы и российские реалии // Географический вестник. 2023. № 2(65). С. 12–25. END: CDDBR1
3. Волков Б.А. Экономика железнодорожного строительства и путевого хозяйства: учебник М.: Маршрут, 2003. Дата обращения: 05.02.2024. Режим доступа: <https://umczdt.ru/books/1216/225750>
4. Кин А.А. БАМ и прилегающие территории: уроки и перспективы освоения// Вестник Сибирского университета потребительской кооперации. 2016. № 1(16). С. 57–66. END: VUBRBJ
5. Козленкова К.В. Эффективность работы предприятий путевого хозяйства // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2017. Т.1. С. 295-299. END: ZBGVLP
6. Онищенко Н.Н. Ситуация на рынке труда г. Хабаровска и Хабаровского района во II и III кварталах 2020 г // Московский экономический журнал. 2020. № 12. С. 92. END: HYVSGR
7. Захарчук Н.Д. Проблемы текучести кадров в хабаровской дистанции пути// Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2016. Т. 2. С. 185-187. END: WFQPNД
8. Кобзева И.Н. Особенности управления производительностью труда в транспортной отрасли // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2023. № 7–2. С. 152–155. END: KXXSKJ
9. Бондаренко О.В. Современные проблемы рынка труда в контексте демографического кризиса на примере Хабаровского края // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2012. Т. 2, № 11. С. 85–90. END:PDTBDD
10. Коровашкина Ю.И. Стратегия обеспечения экономической безопасности путевого хозяйства железнодорожного транспорта // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2018. № 2(15). С. 24–31. END:VSCLVF

11. Маймистова К.А. Развитие системы мотивации и стимулирования персонала предприятий ОАО «РЖД» // Экономика и государство: проблемы эффективного управления и развития: Материалы международной научно-практической конференции, Москва, 21–22 января 2021 года. Москва.2021. С. 228–235. END:ZAHRVX
12. Штыбина К.А. Анализ использования фонда заработной платы в качестве инструмента управления трудовыми ресурсами на ОАО «Российские железные дороги» // Вестник науки и образования. 2018. № 17-2(53). С. 23–26. END: VODBZG
13. Науменко С.М. Совершенствование системы управления трудовыми ресурсами предприятия как фактор повышения эффективности // Университетская наука. 2021. № 2(12). С. 78–82. END:JIUZBB
14. Жигар В.И. Повышение производительности звеносборочной линии КБ03 // Известия Транссиба. 2020. № 2(42). С. 60–70. END:YRNJSU

## REFERENCES

1. Modernization of the railway infrastructure of the Baikal-Amur and Trans-Siberian railway with the development of capacity and carrying capacity (second stage). Decree of the Government of the Russian Federation dated April 21, 2021 No.1100-r. (In Russ.) [cited: 05.02.2024] Available from: <http://static.government.ru/media/files/DmnOwIKcEzTEENtaA3snyn22AHdSVbJy.pdf>
2. Makushin MA, Bobrovsky RO, Demidova KV, et al. Socio-economic development of territories in the zone of influence of bam: soviet plans and russian realities. *Geographical Bulletin*. 2023;2(65). (In Russ.) [cited: 05.02.2024] Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54272883> END: CDDBRI
3. Volkov BA. Economics of railway construction and track management. (In Russ.) [cited: 05.02.2024] Available from: <https://umczdt.ru/books/1216/225750/>
4. Kin AA. BAM and surrounding territories: lessons and prospects of development. *Bulletin of the Siberian University of Consumer Cooperation*. 2016;1(16):57–66. (In Russ.) END: VUBRBJ
5. Kozlenkova KV, Demyanovich IV. The operational efficiency of track facilities enterprises. *Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century*. 2017;1:295–299. (In Russ.) END: ZBGVLP.
6. Onishchenko NN, Volkova NV. The situation on the labor market in Khabarovsk and the Khabarovsk region in the II and III quarters of 2020. *Moscow Economic Journal*. 2020;12:92. (In Russ.) END: HYVSGR
7. Zaharchuk ND, Kaminskiy AV. Problems of staff turnover in Khabarovsk distance routes. *Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century*. 2016;2:185–187. (In Russ.) END: WFQPND
8. Kobzeva IN. Features of labor productivity management in the transport industry. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2023;7(2):152–155. (In Russ.) END: KXXSKJ

9. Bondarenko OV. Some modern challenges of the labor market in the context of a demographic crisis, exemplified by the Khabarovsk region of Russia. *Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University*. 2012;2(11):85–90. (In Russ.) END: PDTBDD
10. Korovashkina YuI, Barchukov AV. Economic stability strategy for railway transport track facilities. *Transport of the Asia-Pacific region*. 2018;2(15):24–31. (In Russ.) END: VSCLVF
11. Maimistova KA. Development of the motivation and incentive system for the personnel of Russian Railways enterprises. *Economics and the State: problems of effective management and development: Proceedings of the International Scientific and practical conference, Moscow, January 21-22, 2021*. (In Russ.) END: ZAHRVX
12. Shtybina KA. Analysis of the use of the wage fund as a tool for managing human resources at JSC "Russian Railways". *Bulletin of Science and Education*. 2018;17–2(53):23–26. (In Russ.) END: VODBZG
13. Naumenko SM, Kurbatov VL. Improvement of the enterprise's human resource management system as a factor in improving labor efficiency. *University Science*. 2021;2(12):78–82. (In Russ.) END: HYVSGR
14. Zhigar VI. Improving the productivity of the KB03 link line. *Izvestiya Transsib*. 2020;2(42):60–70. (In Russ.) END: YRNJSU

**Сведения об авторах:**

**Демьянович Ирина Васильевна**, кандидат экономических наук, доцент;  
eLibrary SPIN: 8077-6352; ORCID: 0000-0002-0686-709X;  
E-mail: irina18091@ya.ru

**Information about the author:**

**Irina V. Demyanovich**, Associate Professor, Candidate of Economic Sciences,  
eLibrary SPIN: 8077-6352; ORCID: 0000-0002-0686-709X;  
E-mail: irina18091@ya.ru