

ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

MODERN
TRANSPORTATION
SYSTEMS AND
TECHNOLOGIES
peer-review journal

transsyst.ru

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)
BAK (Высшая аттестационная комиссия)
Google Scholar
WorldCat
Crossref
CyberLeninka

КОНТАКТЫ

Адрес: 190031, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 115, ауд. 9/11-5
E-mail: transsyst@mail.ru
WEB: www.transsyst.ru
Телефон: +7 (911) 2384445

Научный редактор В.В. Никитин, доктор технических наук, профессор
Перевод на английский язык А.Ю. Гнатенко
Редактор сайта М.Д. Боярский
Ответственный редактор О.Ю. Смирнова
Верстка Т.С. Антонова

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 "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://transsyst.ru/> Рукопись и дополнительные материалы следует оформить в соответствии с правилами редакции, см. подробно по <https://transsyst.ru/transsyst/about/submissions>

ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Том 9, № 4

2023

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР****Титова Тамара 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, Dr., Заместитель декана Факультета логистики и управления транспортом Паняпиватского 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 Хьён-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: transsyst@mail.ru
Website: www.transsyst.ru
Phone: +7 (911) 2384445

Science Editor V.V. Nikitin, Doctor of Technical Science, Professor
Translation into English A.Yu. Gnatenko
WEB- Editor M.D. Boyarsky
The Executive Editor O.Yu. Smimova
Layout Editor T.S. Antonova

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://transsyst.ru/>

The manuscript and additional materials should be prepared and arranged in accordance with the author guidelines (see in detail at: <https://transsyst.ru/transsyst/about/submissions>)

MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY

Vol. 9, Issue 4

2023

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. Ledyayev, 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.

СОДЕРЖАНИЕ		TABLE OF CONTENTS
ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ		ORIGINAL STUDIES
Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы Исаков А.Л., Бухов С.И. Определение параметров противопучинных конструкций земляного полотна с учетом системы промерзания	5	Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Ground transport and logistics facilities and complexes Isakov A.L., Bukhov S.I. Determination of parameters of anti-heave structures of the subgrade taking into account the freezing system
Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы Сугоровский А.В., Сугоровский Ан.В. Применением имитационного моделирования при выборе варианта реконструкции станции Санкт-Петербург-Главный в связи с вводом ВСЖМ-1	18	Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Ground transport and logistics facilities and complexes Sugorovsky A.V., Sugorovsky An.V. The use of simulation modeling when choosing the option of reconstruction of the St. Petersburg-Main station in connection with the commissioning of HSH-1
Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей Юницкий А.Э., Шаршов Р.А., Цырлин М.И. Оценка прочности промежуточных опор рельсо-струнной путевой структуры в центре uSky в Шардже (ОАЭ)	30	Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels Unitsky A.E., Sharshov R.A., Tsyrlin M.I. Evaluation of the strength of intermediate supports string-rail track structure at the uSky center in Sharjah (UAE)
Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей Ермошин Н.А., Кириллова Д.Ю. Метод прогнозирования долговечности дорожных сооружений	46	Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels Ermoshin N.A., Kirillova D.Yu. Method of forecasting the durability of road structures
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнические комплексы и системы Никитин В.В., Чжао Т. Линейный генератор для энергообеспечения бортовых потребителей высокоскоростных магнитолевитационных экипажей	59	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnical complexes and systems Nikitin VV, Zhao T. Linear Generator for Power Supply to On-Board Consumers of High-Speed Magnetically Levitated Carriages

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнология и электрофизика Михайлова И.К., Мартиросян И.В., Руднев И.А., Покровский С.В., Новиков М.С. Численный анализ влияния радиационных дефектов на транспортные характеристики сверхпроводящего CORC-кабеля	72	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnology and Electrophysics Mikhailova I.K., Martirosyan I.V., Rudnev I.A., Pokrovskii S.V., Novikov M.S. Numerical Analysis of the Influence of Radiation Defects on the Transport Characteristics of a Superconducting CORC-Cable
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей Тряпицын Ю.В., Тряпкин Д.А. Совершенствование расчета ледовых переправ	86	Rubric 2. Scientific and practical developments Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels Tryapitsyn Y.V., Tryapkin D.A. Improvement of the calculation of ice crossings
Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА Журавлева Н.А., Никитин А.Б., Чеченова Л.М. Обеспечение экономической безопасности маневрового оператора порта на основе роста инвестиционного потенциала деятельности	94	Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS Zhuravleva N.A., Nikitin A.B., Chechenova L.M. Ensuring the economic security of the port shunting operator based on the growth of the investment potential of the activity
Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА Казанская Л.Ф., Баталова Н.В. Инновационные технологии в развитии высокоскоростного наземного транспорта	108	Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS Kazanskaya L.F., Batalova N.V. Innovative technologies in the development of high-speed ground transport
Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА Васильева М.Е., Волкова Е.М., Романов А.С. Интеллектуальные транспортные системы в российских агломерациях: сущность, структура и направления развития	117	Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS Vasilyeva M.E., Volkova E.M., Romanov A.S. Intelligent transport systems in russian megacities: the essence, structure and directions of development

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

УДК [UDC] 624.139.22

DOI 10.17816/transsyst2023945-17

© А.Л. Исаков, С.И. Бухов

Сибирский государственный университет путей сообщения
(Новосибирск, Россия)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОТИВОПУЧИННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА С УЧЕТОМ СИСТЕМЫ ПРОМЕРЗАНИЯ

Обоснование: в Северном полушарии при строительстве и эксплуатации железных дорог одной из актуальных проблем является морозное пучение. Одним из ключевых факторов, оказывающим влияние на величину морозного пучения, является залегание грунтовых вод относительно фронта промерзания грунтов земляного полотна, который не в полной мере учитывается существующими подходами к определению параметров противопучинных конструкций. Данный фактор принято характеризовать режимами промерзания, их два – открытая и закрытая система промерзания. Открытая система характеризуется близким расположением грунтовых вод к фронту промерзания, при котором происходит постоянный приток воды (миграция) к зоне фазовых переходов, что делает процесс морозного пучения непрогнозируемым, а определение коэффициента морозного пучения некорректным. Закрытая система промерзания предполагает отсутствие или глубокое расположение грунтовых вод (разница уровня фронта промерзания и грунтовых вод превышает высоту капиллярного поднятия воды).

Цель: повышение эффективности расчета параметров противопучинных конструкций в зависимости от режима промерзания земляного полотна железных дорог.

Материалы и методы: сравнительный анализ методов расчета параметров противопучинных конструкций, экспериментальные исследования процесса морозного пучения при открытой системе промерзания глинистых грунтов.

Результаты: на основании экспериментальных исследований режимов промерзания предложен дифференцированный подход к оценке характеристики морозного пучения с учетом особенностей протекания процесса морозного пучения.

Заключение: предлагаемый метод с дифференцированным подходом выгодно отличается от существующих, позволяя снизить расход строительного материала при проектировании противопучинных мероприятий.

Ключевые слова: морозное пучение, коэффициент пучения, системы промерзания, земляное полотно, показатель пучения, температурный критерий..

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Ground transport and logistics facilities and complexes

© **Alexander L. Isakov, Stepan I. Bukhov**

Siberian Transport University

(Novosibirsk, Russia)

DETERMINATION OF PARAMETERS OF ANTI-HEAVE STRUCTURES OF THE SUBGRADE TAKING INTO ACCOUNT THE FREEZING SYSTEM

Background: in the Northern Hemisphere, during the construction and operation of railways, one of the pressing problems is frost heaving. One of the key factors influencing the amount of frost heaving is the occurrence of groundwater relative to the freezing front of the subgrade soils, which is not fully taken into account by existing approaches to determining the parameters of anti-heaving structures. This factor is usually characterized by freezing regimes, there are two of them - open and closed freezing systems. An open system is characterized by the proximity of groundwater to the freezing front, at which there is a constant influx of water (migration) to the zone of phase transitions, which makes the process of frost heaving unpredictable, and the determination of the frost heave ratio incorrect. A closed freezing system assumes the absence or deep location of groundwater (the difference in the level of the freezing front and groundwater exceeds the height of the capillary rise of water).

Aim: development of a method for calculating the parameters of anti-heaving structures depending on the freezing regime of railway subgrades.

Materials and Methods: comparative analysis of methods for calculating the parameters of anti-heaving structures, experimental studies of the process of frost heaving in an open system of freezing of clay soils.

Results: based on experimental studies of freezing regimes, a differentiated approach to assessing the characteristics of frost heaving is proposed, taking into account the peculiarities of the frost heaving process.

Conclusion: the proposed method with a differentiated approach compares favorably with existing ones, allowing to reduce the consumption of building materials when designing anti-heaving measures.

Key words: frost heaving, frost heave ratio, freezing systems, subgrade, heaving index, temperature criterion.

ВВЕДЕНИЕ

Морозное пучение – это актуальная проблема при строительстве наземных и подземных сооружений в зонах с сезонным промерзанием грунтов. Данное явление представляет собой внутриобъемное деформирование грунтов, приводящее к увеличению их объема вследствие кристаллизации поровой и мигрирующей воды с образованием кристаллов и линз льда [1].

Основным критерием оценки степени пучинистости грунта является коэффициент пучения (относительная деформация морозного пучения ε_{fn}

[2]), который определяется экспериментальным методом, описанным в ГОСТ 28622-2012 [1]. Грунт считается пучинистым, если коэффициент пучения $K_{\text{пуч}} \geq 0,01$ [2].

На дорогах пучение проявляется в виде пучинных горбов, впадин, перепадов, а также перекосных и односторонних пучин [3]. При проектировании нового или реконструкции существующего земляного полотна в нормативной документации морозное пучение принято оценивать высотой морозного пучения $h_{\text{пуч}}$, которая не должна превышать допустимых значений $[h_{\text{пуч}}]$, т.е. условием допустимости величины морозного пучения земляного полотна является критерий

$$h_{\text{пуч}} \leq [h_{\text{пуч}}], \quad (1)$$

$h_{\text{пуч}}$ – высота морозного пучения;

$[h_{\text{пуч}}]$ – допустимое значение высоты морозного пучения, для железных (табл. 1) [4] и автомобильных (табл. 2) дорог [5].

Таблица 1. Допустимая высота равномерного морозного пучения на железных дорогах

Категория дороги	Скоростная, пассажирская	Особогрузо-напряженная	I и II	III	IV
Высота пучения	10 мм	15 мм	20 мм	25 мм	35 мм

Таблица 2. Допустимая высота равномерного морозного пучения на автомобильных дорогах

Тип дорожных одежд	Вид покрытия	Допустимая величина морозного пучения
Капитальные	Асфальтобетонное	40 мм
Облегченные	Асфальтобетонное	60 мм
Переходные	Переходное	100 мм

Высота морозного пучения определяется зависимостью

$$h_{\text{пуч}} = K_{\text{пуч}} \cdot H_f, \quad (2)$$

$h_{\text{пуч}}$ – высота морозного пучения;

$K_{\text{пуч}}$ – коэффициент морозного пучения (относительная деформация морозного пучения ε_{fh} [2]);

H_f – глубина промерзания грунта.

Следует отметить, что земляное полотно представляет собой неоднородный по глубине массив грунтов, поэтому при расчете высоты морозного пучения необходимо учитывать деформацию каждого залегаемого слоя грунта, расположенного под основной площадкой земляного полотна. Исходя из этого, формула (2) будет иметь вид

$$h_{\text{пуч}} = \sum_{i=1}^{N-1} K_{\text{пуч}}^i \cdot H_i + K_{\text{пуч}}^N \cdot H_N, \quad (3)$$

N – количество слоев грунта;

$K_{\text{пуч}}^i$ – коэффициент пучения грунта в i -м слое;

H_i – толщина i -м слоя;

$K_{\text{пуч}}^N$ – коэффициент пучения грунта в N -м слое;

H_N – толщина промерзшей части (нижнего) N -го слоя.

Среди многочисленных факторов, влияющих на процесс морозного пучения, одним из ключевых является режим промерзания грунтов. Главным образом, он характеризуется глубиной залегания грунтовых вод. Принято различать две схемы промерзания – закрытая система и открытая.

В данной работе предлагается усовершенствованный дифференцированный подход к оценке параметров морозного пучения с учетом системы промерзания грунтов земляного полотна.

ЗАКРЫТАЯ СИСТЕМА ПРОМЕРЗАНИЯ

Закрытая система встречается, как правило, в насыпях высотой более двух метров, где залегание грунтовых вод находится ниже подошвы насыпи на высоту капиллярного поднятия воды. При этом внешний приток воды в зону промерзания отсутствует, а процесс морозного пучения происходит за счет влаги, содержащейся в порах грунта внутри этой зоны. Миграция воды при промерзании грунта здесь происходит внутри этой зоны и аккумулируется в ее верхней части. В [6] предложен метод определения коэффициента морозного пучения при закрытой системе промерзания с учетом идеализации перераспределения влаги внутри зоны промерзания грунта, представленной на Рис. 1.

Коэффициент пучения в этом случае определяется формулой [6]

$$K_{\text{пуч}}^3 = 0,09 \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot (W_{\text{sat}} - W_{\text{нз}}) \cdot S_{\text{cr}}, \quad (4)$$

ρ_d – плотность сухого грунта;

ρ_w – плотность воды;

W_{sat} – влажность полностью водонасыщенного грунта;

$W_{\text{нз}}$ – доля незамерзшей воды (5);

S_{cr} – показатель пучения (параметр, введенный в [6]) (6).

Доля незамерзшей воды определяется выражением

$$W_{\text{нз}} = k_w \cdot W_p, \quad (5)$$

k_w – коэффициент, зависящий от числа пластичности грунта и температуры мерзлого грунта [2];

W_p – влажность на границе пластичности (раскатывания).

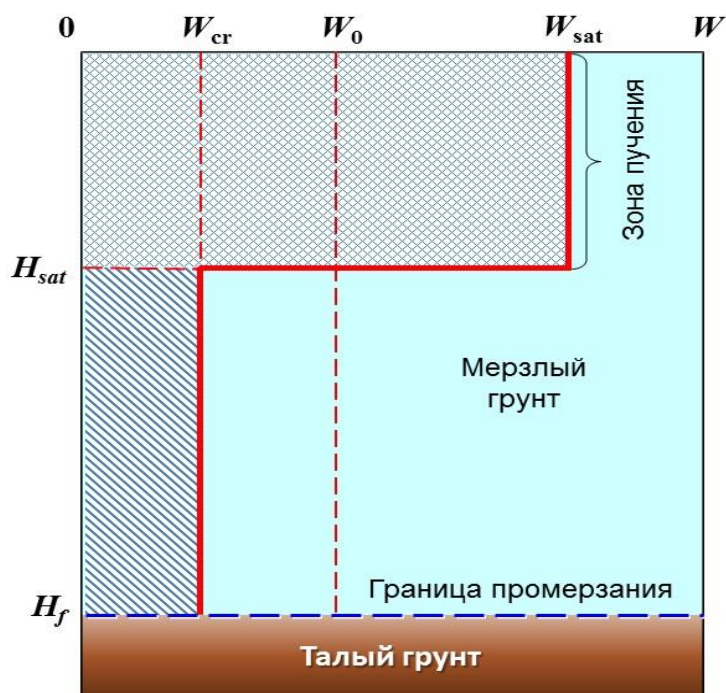
Показатель пучения S_{cr} характеризует степень пучения грунта относительно максимальных значений, реализуемого при полном влагонасыщении [6] и определяется формулой

$$S_{cr} = \frac{W_0 - W_{cr}}{W_{sat} - W_{cr}}, \quad (6)$$

W_0 – предзимняя влажность грунта;

W_{cr} – эмпирический параметр критическая влажность грунта, при которой в нем прекращается перераспределение влаги, вызывающее морозное пучение [7];

W_{sat} – влажность полностью водонасыщенного грунта.



W_{cr} – критическая влажность; W_0 – предзимняя влажность грунта;

W_{sat} – влажность полностью водонасыщенного грунта; H_{sat} – глубина зоны аккумуляции воды до полного водонасыщения; H_f – глубина промерзания грунта.

Рис. 1. Схема перераспределения влаги в зоне промерзания

Полученные значения параметров коэффициента пучения $K_{пуч}$ и глубины промерзания грунта H_f подставляются в выражение (2). В случае невыполнения критерия (1) принимается решение о проектировании противопучинных мероприятий, выбор которых зависит от причин образования деформаций [1], либо требований к категории вновь строящегося земляного полотна и технико-экономического обоснования.

Как следует из Рис. 1, вышеприведенная оценка коэффициента пучения (4,6) имеет смысла при условии $W_0 > W_{cr}$, когда показатель пучения S_{cr} изменяется строго в пределах от 0 до 1. Если $W_0 \leq W_{cr}$, то, согласно определению понятия критической влажности, перераспределение влаги не происходит, и все вышеприведенные рассуждения теряют смысл.

Поэтому рассмотрим отдельно этот редко встречаемый на практике случай, когда предзимняя влажность W_0 не превосходит критическую W_{cr} .

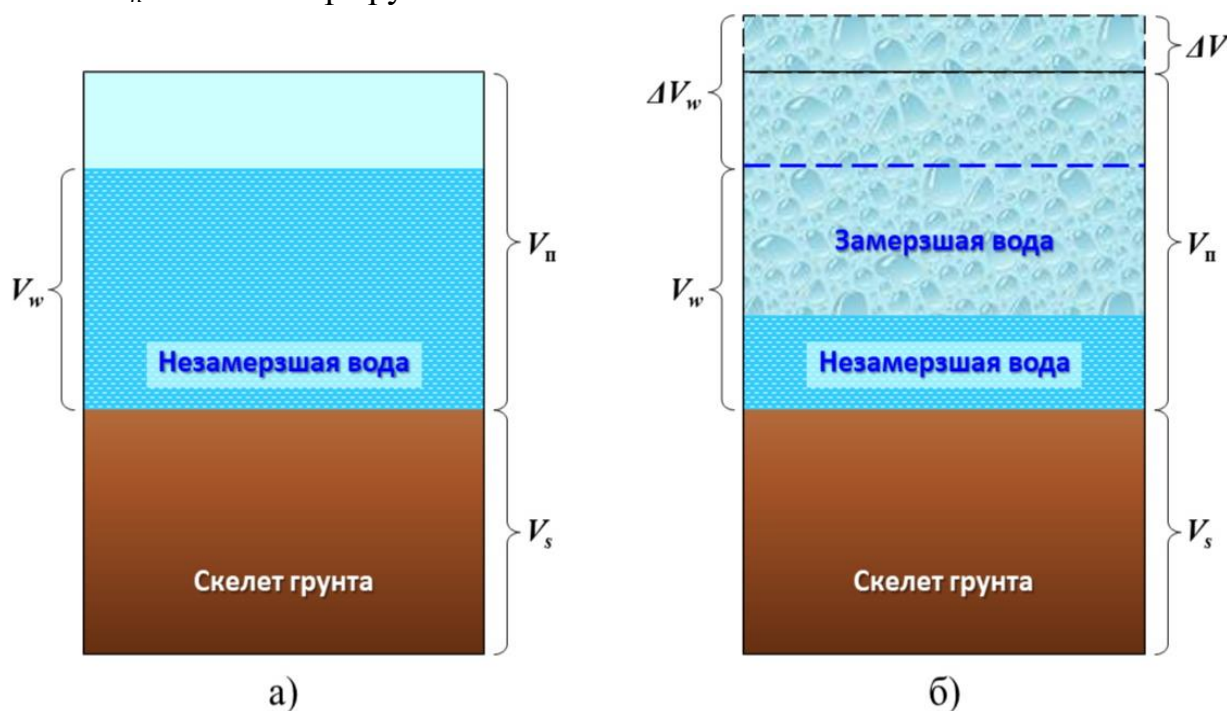
При отсутствии миграции воды, находящейся в порах грунта, и в предположении одномерности деформации грунта (Рис. 2), коэффициент пучения можно представить следующим выражением

$$K_{\text{пуч}}^3 = \frac{\Delta V}{V_s + V_n}, \quad (7)$$

ΔV – приращение объема грунта при пучении;

V_s – объем твердых частиц грунта;

V_n – объем пор грунта.



а) – до начала пучения; б) – после завершения пучения

Рис. 2. Схема приращения объема воды в порах при замерзании в отсутствие криогенной миграции влаги в зоне промерзания

В соответствии с Рис. 2, приращение объема грунта при пучении имеет вид

$$\Delta V = V_w + \Delta V_w - V_n, \quad (8)$$

V_m – объем воды в грунте;

ΔV_m – приращение объема замёрзшей воды (9).

$$\Delta V_w = 0,09 \cdot (V_w - V_{\text{нз}}), \quad (9)$$

$V_{\text{нз}}$ – доля незамерзшей воды.

Подставляя (8) и (9) в (7) получим

$$K_{\text{пуч}}^3 = \frac{V_w + 0,09 \cdot (V_w - V_{\text{нз}}) - V_n}{V_s + V_n}, \quad (10)$$

Поделив числитель и знаменатель в (10) на V_n и сделав необходимые преобразования, окончательно получим

$$K_{\text{пуч}}^3 = \frac{e}{1+e} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \frac{1,09 \cdot W_0 - 0,09 \cdot W_{\text{нз}}}{e} - 1 \right). \quad (11)$$

Выражение (11) определяет коэффициент пучения при закрытой системе промерзания грунта, если его предзимняя влажность W_0 не превосходит критическую W_{cr} . Разумеется, если результат вычислений по формуле (11) окажется отрицательным, то это означает, что пучение грунта в этом случае отсутствует.

ОТКРЫТАЯ СИСТЕМА ПРОМЕРЗАНИЯ

Открытая система предполагает близкое расположение грунтовых вод к фронту промерзания, а расстояние между ними не превышает высоты капиллярного поднятия. В этом случае, согласно закону о миграции (подтягиванию) воды к фронту промерзания, происходит постоянный приток воды в зону фазовых переходов, приводящий к появлению ледяных включений в виде линз и других образований. Как следствие, объем замерзшей воды может в разы превышать исходный объем пор, а морозное пучение развивается непрогнозируемо. Из чего следует, что априорная оценка коэффициента морозного пучения по условию (1) не корректна.

В данном случае более естественным выглядит критерий, приводящий к полному выведению зоны интенсивного морозного пучения из глинистых грунтов земляного полотна и его основания. В качестве такого критерия можно принять следующее условие

$$T < T_{\text{пуч}}, \quad (12)$$

T – температура грунта земляного полотна;

$T_{\text{пуч}}$ – температура начала интенсивного морозного пучения.

Температурой начала интенсивного пучения считается такая температура, при которой в грунте развиваются усилия, достаточные для поднятия верхнего строения пути с защитным слоем из дренирующего грунта.

Применение критерия (12) предполагает экспериментальное определение температуры начала интенсивного морозного пучения $T_{\text{пуч}}$ в зависимости от характеристики, отражающую способность грунта удерживать воду – числа пластичности I_p .

В рамках данной работы определение величины $T_{\text{пуч}}$ было проведено лабораторным путем [8] с использованием установки ГТ 1.1.8 (Рис. 3), позволяющей варьировать температуру промерзания образца грунта.

Лабораторные испытания проводились следующим образом.

Глинистый грунт, с приложенной к нему вертикальной нагрузкой 20 кПа, выдерживался в холодильной камере до стабилизации в нем температуры, равной $+1^{\circ}\text{C}$. Затем производилось поэтапное промораживание образца грунта, которое предполагало понижение температуры промерзания с шагом $0,10^{\circ}\text{C}$ до появления вертикальных деформаций пучения в образце грунта.



Рис. 3. Прибор ГТ 1.1.8 для определения степени морозного пучения

На Рис. 4 приведены результаты экспериментов по определению параметра $T_{\text{пуч}}$ для глинистых грунтов:

- ✓ число пластичности I_p , изменяется в интервале от 0,04 до 0,23;
- ✓ коэффициент пористости e , варьируется в пределах от 0,6 до 1,0.

Результаты экспериментов показывают, что температура интенсивного морозного пучения $T_{\text{пуч}}$ и число пластичности грунта I_p имеют устойчивую линейную корреляцию, достаточную для проведения априорного расчета параметров противопучинных конструкций. Для более точных расчетов рекомендуется в каждом конкретном случае уточнение параметра $T_{\text{пуч}}$ лабораторным путем.

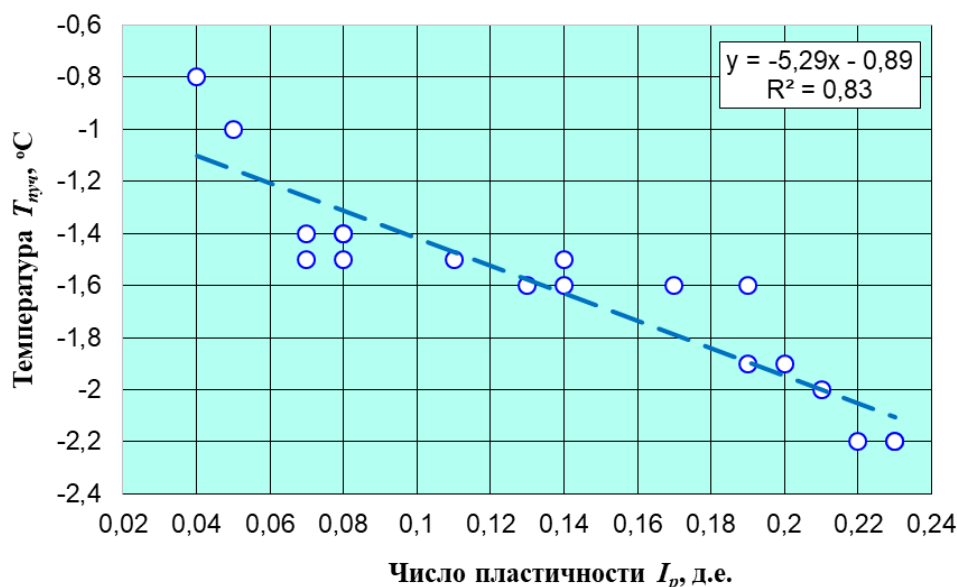


Рис. 4. Зависимость экспериментальных значений температуры начала интенсивного морозного пучения от числа пластичности глинистого грунта

Резюмируя вышесказанное, предлагаемый метод определения параметров противопучинных конструкций на земляном полотне железных, рекомендуется выполнять по следующему алгоритму:

✓ сначала определяется система промерзания грунтов земляного полотна;

✓ при закрытой системе оценка величины пучения для обоснования необходимости использования противопучинных мероприятий и, при необходимости, для дальнейшего определения их параметров производится с использованием коэффициента пучения, определяемого по формулам (4) или (11);

✓ при открытой системе промерзания обоснование параметров противопучинных конструкций выполняется по условию полного выведения зоны интенсивного морозного пучения из грунтов основной площадки земляного полотна в соответствии с критерием (12).

Для оценки эффективности предлагаемого метода, ниже приводятся результаты сопоставительных расчетов (Табл. 3, 4) определения толщины теплоизолирующего покрытия из пенополистирола, укладываемого на основную площадку земляного полотна, с использованием вышеизложенного дифференцированного подхода и существующих утвержденных методик [3, 9]. Расчеты с дифференцированием систем промерзания проводились для климатических условий Юга Западной Сибири с помощью программы Freeze-1 [10], в которой полностью реализован предложенный алгоритм.

Из приведенных таблиц хорошо видна разница в оценках необходимой толщины пенополистирола, сделанных с помощью

нормативных документов [3, 9] и по предлагаемой методике. В первом случае (Табл. 3) расчетная толщина пенополистирола по существующим методикам варьирует в пределах от 10 до 13 см, в то время как предлагаемая методика дает значения от 4 до 7 см. Во втором случае, при толщине защитного слоя 0,6 м (Табл. 4), аналогичные значения варьируют от 6 до 8 см при нормативных расчетах и от 2 до 4 по предлагаемой методике.

Таким образом, предложенная методика к определению параметров противопучинных конструкций, по сравнению с принятыми методиками, позволяет значительно (в 2–2,5 раза) снизить расход пенополистирола при проектировании противопучинных мероприятий.

Таблица 3. Расчетные значения толщины пенополистирола (с учетом смятия) в сантиметрах при толщине защитного слоя 0,05 м, полном водонасыщении грунтов и различных значениях коэффициента пористости

Методика	e	Толщина пенополистирола, см				
		$I_p=0,06$	$I_p=0,10$	$I_p=0,13$	$I_p=0,16$	$I_p=0,20$
ЦПИ-24	—	14				
Инструкция [9]	0,60	13	11	10	-	-
	0,70	-	13	12	12	11
	0,85	-	-	-	13	13
Закрыва- тельная система (Freeze-1)	0,60	5	5	4	4	4
	0,70	5	5	4	4	4
	0,85	5	5	4	4	4
Открытая система (Freeze-1)	0,60	6	7	4	4	4
	0,70	6	7	7	7	6
	0,85	6	6	6	6	5

Таблица 4. Расчетные значения толщины пенополистирола (с учетом смятия) в сантиметрах при толщине защитного слоя 0,60 м, полном водонасыщении грунтов и различных значениях коэффициента пористости

Методика	e	Толщина пенополистирола, см				
		$I_p=0,06$	$I_p=0,10$	$I_p=0,13$	$I_p=0,16$	$I_p=0,20$
ЦПИ-24	—	7				
Инструкция [9]	0,60	8	7	6	-	-
	0,70	-	8	7	7	6
	0,85	-	-	-	8	8
Закрыва- тельная система (Freeze-1)	0,60	2	2	2	2	2
	0,70	2	2	2	2	2
	0,85	3	2	2	2	2
Открытая система (Freeze-1)	0,60	3	4	3	2	2
	0,70	3	3	4	4	3
	0,85	3	3	3	3	3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлен метод расчета параметров противопучинных конструкций земляного полотна, в основе которого лежит дифференцированный подход с учетом особенностей протекания процесса морозного пучения при различных режимах промерзания грунта.

2. Критерии оценки характеристик морозного пучения (1) и (7) основываются на результатах экспериментальных исследований, обосновывающих их достоверность и применимость при проектировании противопучинных конструкций.

3. Предложенный метод показал более высокую точность расчетов параметров противопучинных конструкций по сравнению с принятыми методиками, снижая расход материалов и объем трудозатрат на противопучинные мероприятия при строительстве и эксплуатации земляного полотна.

Авторы заявляют, что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. ГОСТ 28622-2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости. – М.: Стандартинформ, 2012. – 11 с. [GOST 28622-2012 Soils. Laboratory method for determining the degree of heaving. Moscow: Standartinform, 2012. 11 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data/564/56436.pdf> Ссылка доступна на: 28.11.23.
2. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2020. – 38 с. [GOST 25100-2020. Soils. Classification. Moscow: Standardinform, 2020. 38 p. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 28.11.23. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293719/4293719820.pdf>
3. Технические указания по устранению пучин и просадок железнодорожного пути. – М.: Транспорт, 1997. – 59 с. [TsPI-24. Technical instructions for eliminating heaves and subsidence of the railway track. Moscow: Transport, 1997. 59 p. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 28.11.23. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293754/4293754467.htm#i358776>
4. СП 238.1326000.2015. Железнодорожный путь. – М., 2015. – 71 с. [SP 238.1326000.2015. Railway track. Moscow, 2015. 71 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293756/4293756865.pdf> Ссылка доступна на: 28.11.23.
5. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. – М., 2001. – 148 с. [ODN 218.046-01. Design of flexible pavements. Moscow, 2001. 148 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294847/4294847959.htm>. Ссылка доступна на: 28.11.23.
6. Исаков А.Л., Бухов С.И. К оценке коэффициента морозного пучения глинистых грунтов земляного полотна при закрытой системе промерзания

- области // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1(56). – С. 92–98. [Isakov AL, Bukhov SI. To assess the frost heave ratio of clayey soils of the roadbed in a closed freezing system of the region. *Bulletin of the Siberian State University of Railway Transport*. 2021;1(56):92-98. (In Russ.)]. doi: 10.52170/1815-9262_2021_56_92
7. Орлов В.О., Дубнов Ю.Д., Меренков Н.Д. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений. – Л.: Стройиздат. 1977. – 185 с. [Orlov VO, Dubnov YuD, Merenkov ND. *Puchenie promerzayushchih gruntov i ego vliyanie na fundamenty sooruzhenij*. Leningrad: Stroyizdat, 1977. 185 p. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 28.11.23. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007688543?ysclid=lq7qw0gvfd248743306>
 8. Бухов С.И., Исаков А.Л. Определение температуры начала интенсивного морозного пучения в глинистых грунтах при открытой системе промерзания // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. – 2022. – № 4 (7). – С. 80. [Bukhov SI, Isakov AL. Determination of the temperature of the onset of intense frost heaving in clayey soils with an open freezing system. *Fundamental and applied issues of transport*. 2022;4(7):8. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 28.11.23. Доступно по: <https://fpvt.ru/public/>
 9. Инструкции по устройству подбалластных защитных слоев при реконструкции (модернизации) железнодорожного пути. – М., 2012. – 53 с. [Instructions for the installation of sub-ballast protective layers during the reconstruction (modernization) of a railway track. Moscow, 2012. 53 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://jd-doc.ru/2012/dekabr-2012/3877-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-12-12-2012-n-2544r> Ссылка доступна на: 28.11.23.
 10. Методика назначения противопучинных мероприятий и выбора их параметров на железных и автомобильных дорогах на базе программного комплекса Freeze-1. [Methodology for prescribing anti-heavy measures and selecting their parameters on railways and roads based on the *Freeze-1* software package. (In Russ.)]. Доступно по: <http://freeze-1.stu.ru/index.htm> Ссылка доступна на: 28.11.23.

Сведения об авторах:

Исаков Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 4190-0631; ORCID: 0000-0001-8093-6826;
E-mail: mylab.alex@yandex.ru

Бухов Степан Игоревич, аспирант;
ORCID: 0000-0002-9900-0021;
E-mail: bsybuhov@mail.ru

Information about the authors:

Alexander L. Isakov; Doctor of Technical Sciences, Professor;
eLibrary SPIN: 4190-0631; ORCID: 0000-0001-8093-6826;
E-mail: mylab.alex@yandex.ru

Stepan I. Bukhov; postgraduate;
ORCID: 0000-0002-9900-0021;
E-mail: bsybuhov@mail.ru

Цитировать:

Исаков А.Л., Бухов С.И. Определение параметров противопучинных конструкций земляного полотна с учетом системы промерзания // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 5–17. doi: 10.17816/transsyst2023945-17

To cite this article:

Isakov AL, Bukhov SI. Determination of parameters of anti-heave structures of the subgrade taking into account the freezing system. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(4):5-17. doi: 10.17816/transsyst2023945-17

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

УДК [UDC] 656.21

DOI 10.17816/transsyst20239418-29

© А.В. Сугоровский¹, Ан.В. Сугоровский²

¹АО «Институт экономики и развития транспорта»

²Российский университет транспорта (МИИТ)
(Москва, Россия)

ПРИМЕНЕНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ВЫБОРЕ ВАРИАНТА РЕКОНСТРУКЦИИ СТАНЦИИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГ-ГЛАВНЫЙ В СВЯЗИ С ВВОДОМ ВСЖМ-1

Цель: с применением имитационного моделирования проанализировать и выбрать наиболее рациональный вариант реконструкции станции Санкт-Петербург-Главный с частичным сохранением складов Кокоревых, включенных в список объектов культурного наследия.

Методы: для достижения поставленной цели использованы методы имитационного моделирования.

Результаты: выполнен анализ трёх вариантов реконструкции станций Санкт-Петербург-Главный и Санкт-Петербург-Тов.-Московский, необходимой в связи строительства высокоскоростной магистрали Санкт-Петербург – Москва (ВСЖМ-1) и устройством конечного терминала ВСЖМ-1 на территории перронного парка станции Санкт-Петербург-Главный. Методом имитационного моделирования определено необходимое и достаточное путевое развитие станций, предложен вариант реконструкции с частичным сохранением складов Кокоревых, включенных в список объектов культурного наследия.

Заключение: реализация предложенного варианта реконструкции перронного парка станции Санкт-Петербург-Главный позволит, без необходимости реконструкции локомотивного хозяйства и технических парков, частично сохранить склады Кокоревых, включенные в список объектов культурного наследия.

Ключевые слова: имитационное моделирование, пассажирская станция, горловина, пассажирская-техническая станция, система ИМЕТРА.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Ground transport and logistics facilities and complexes

© A.V. Sugorovsky¹, A.V. Sugorovsky²

¹JSC Institute of economy and development of transport

²Russian University of Transport (MIIT)
(Moscow, Russia)

THE USE OF SIMULATION MODELING WHEN CHOOSING THE OPTION OF RECONSTRUCTION OF THE ST. PETERSBURG-MAIN STATION IN CONNECTION WITH THE COMMISSIONING OF HSH-1

Aim: with the use of simulation modeling, analyze and choose the most rational option for the reconstruction of the St. Petersburg-Main station with partial preservation of the Kokorev warehouses included in the list of cultural heritage objects.

Methods: methods of simulation modeling.

Results: the analysis of three options for the reconstruction of the stations St. Petersburg-Main and St. Petersburg-Tov.-Moscow, necessary in connection with the construction of the St. Petersburg-Moscow high-speed highway (HSH-1) and the arrangement of the final terminal of HSH-1 on the territory of the apron park of the St. Petersburg-Main station. By the method of simulation modeling, the necessary and sufficient track development of the stations was determined, a reconstruction option with partial preservation of the Kokorev warehouses included in the list of cultural heritage objects was proposed.

Conclusion: the implementation of the proposed option for the reconstruction of the platform park of the St. Petersburg-Glavny station will allow, without the need for reconstruction of the locomotive facilities and technical parks, partially preserve the warehouses of the Kokorevs included in the list of cultural heritage sites.

Key words: simulation modeling, passenger station, yard neck, passenger technical station, IMATRA system.

ВВЕДЕНИЕ

В эпоху активного развития технологий, ускорения темпа жизни, когда время становится ценнейшим ресурсом, высокие скорости движения поездов, сокращая время в пути, способствуют повышению транспортной мобильности населения и отвечают требованиям времени. Сегодня в качестве первого перспективного маршрута реализации проекта создания высокоскоростных магистралей в России является направление между Москвой и Санкт-Петербургом [1].

Основными территориями, через которые планируется прокладка магистрали, будут город Москва, Московская, Тверская, Новгородская, Ленинградская области и город Санкт-Петербург.

Несмотря на огромное преимущество создания высокоскоростной магистрали, градозащитники высказывают опасения, что строительство ВСЖМ-1 может привести «к новым архитектурным жертвам среди объектов культурного наследия, среди которых – склады Кокоревых» [2].

Эти причины стали основополагающими для того, чтобы провести анализ имеющихся проектов реконструкции станций Санкт-Петербург-Главный и Санкт-Петербург-Тов.-Московский, предложить наиболее рациональный с сохранением складов Кокоревых, включенных в список объектов культурного наследия.

КРАТКАЯ ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СТАНЦИЙ

Станция Санкт-Петербург-Главный является пассажирской внеклассной станцией с объемлющим расположением главных путей. При этом два главных пути находятся со стороны складов Кокоревых (I-й и III-й) и один – с противоположной стороны (II-й). По схеме путевого развития Санкт-Петербург-Главный относится к тупиковой с последовательным расположением перронного и технических парков. На станции выполняются все виды технологических операций с дальними и пригородными поездами.

Для приёма и отправления пригородных и дальних поездов на станции имеется 11 перронных путей, а для посадки и высадки пассажиров – 6 высоких пассажирских платформ. Платформы № 1 и 3 (перронные пути 1–3) служат для посадки и высадки пассажиров пригородных поездов и оборудованы «Автоматизированной системой оплаты, контроля и учета проезда в пригородных электропоездах» (АСОКУПЭ). Платформа № 4 (перронные пути 4–5) может служить для приема и отправления пригородных и дальних поездов. Платформы № 5–7 (перронные пути 6–11) специализированы для дальних и местных поездов. Пригородные поезда преимущественно принимаются/отправляются по I-му и III-му главным путям, дальние поезда – по II-му главному пути, подача/уборка составов дальних поездов в технические парки осуществляется по путям, расположенным в центральной части горловины перронного парка. Таким образом, существующая технология работы предусматривает минимальное количество враждебных передвижения в горловине перронного парка.

Станция Санкт-Петербург-Тов.-Московский, расположена последовательно со станцией Санкт-Петербург-Главный.

Для расформирования и формирования составов пассажирских поездов, их экипировки, отстоя, опробования тормозов от централизованного пульта и установки УЗОТ-П на станциях имеется несколько парков:

- Ранжирный;
- Новый;
- парк «А-Н».

Последовательно с этими парками расположен вагонмоечный цех (ВМЦ) на 2 пути для наружной механизированной обмывки составов пассажирских поездов и вагонов.

А за ним – пути парка «Э», предназначенные для технического обслуживания (ТО-1, ТО-2), текущего отцепочного ремонта (ТОР) вагонов, подготовки и экипировки пассажирских составов в рейс поездов своего формирования и формирования других филиалов АО «ФПК» на путях подготовки с полным опробованием тормозов от стационарной

установки (отправляющихся со станций Санкт-Петербург-Главный и части составов, отправляющихся со станции Дача Долгорукова).

В парке «Э» имеется ремонтно-экипировочное депо (РЭД) на 6 путей.

На путях для подготовки составов пассажирских поездов имеются все необходимые устройства.

На Рис. 1 приведена схема станций Санкт-Петербург-Главный и Санкт-Петербург-Тов.-Московский в «рыбках» с указанием технологических операций.

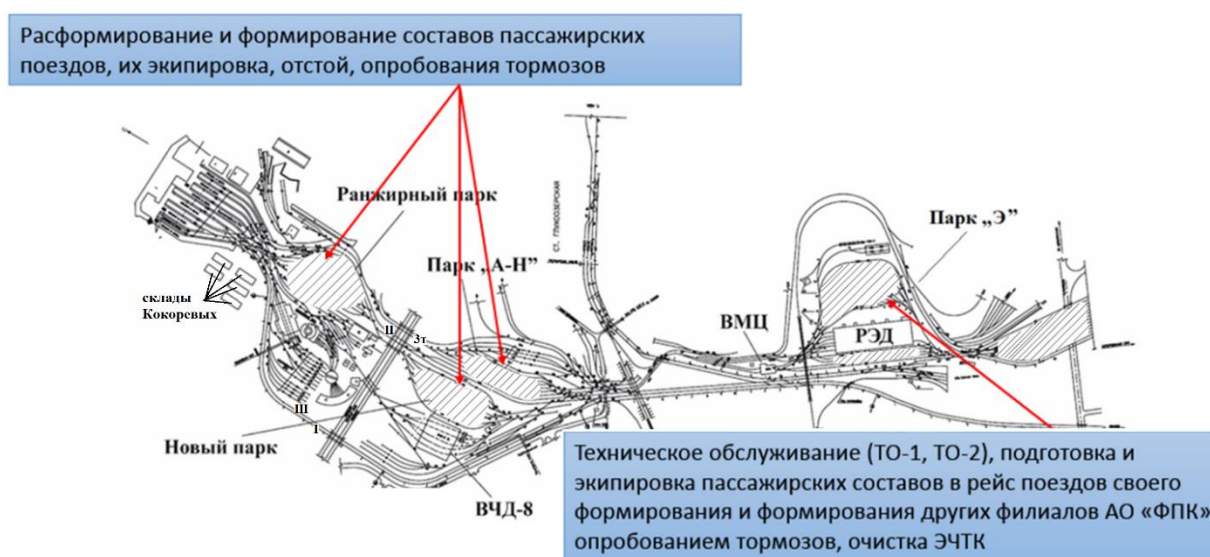


Рис. 1. Схема станций Санкт-Петербург Главный и Санкт-Петербург-Тов.-Московский в «рыбках» с указанием технологических операций

В результате анализа технологических процессов работы станции Санкт-Петербург-Главный и станции Санкт-Петербург-Тов.-Московский, а также типового технологического процесса работы пассажирской и пассажирской технической станции ОАО «РЖД» (Распоряжение ОАО РЖД от 01.12.2015 № 2806р) построены графики обработки составов пассажирских поездов и технологические последовательности выполнения операций по подготовке в рейс составов пассажирских поездов по обороту и своего формирования, заложенные в типовой имитационный модуль работы пассажирской и пассажирской технической станций [3].

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНОГО ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА 2030 ГОД

В соответствии с перспективным графиком движения поездов на 2030 год размеры движения по станции составляют:

1. Поезда дальнего следования локомотивной тяги – 35 пар в сутки.

2. Поезда дальнего следования, обслуживаемые МВПС ЭС2Г «Ласточка» – 3 пары.

3. Пригородные поезда 7000-й нумерации – 37 пар, в том числе:

- тактовые на Тосно – 24 пары;
- на Волховстрой I – 3 пары;
- на Великий Новгород – 8 пар;
- на Любань – 2 пары;

4. Подсылки под пригородные поезда («перегонки» из/в депо) – 6 пар.

На Рис. 2 и Рис. 3 приведены диаграммы распределения прибытия и отправления пригородных и дальних поездов по часам суток соответственно.



Рис. 2. Распределение прибытия и отправления пригородных поездов по часам суток

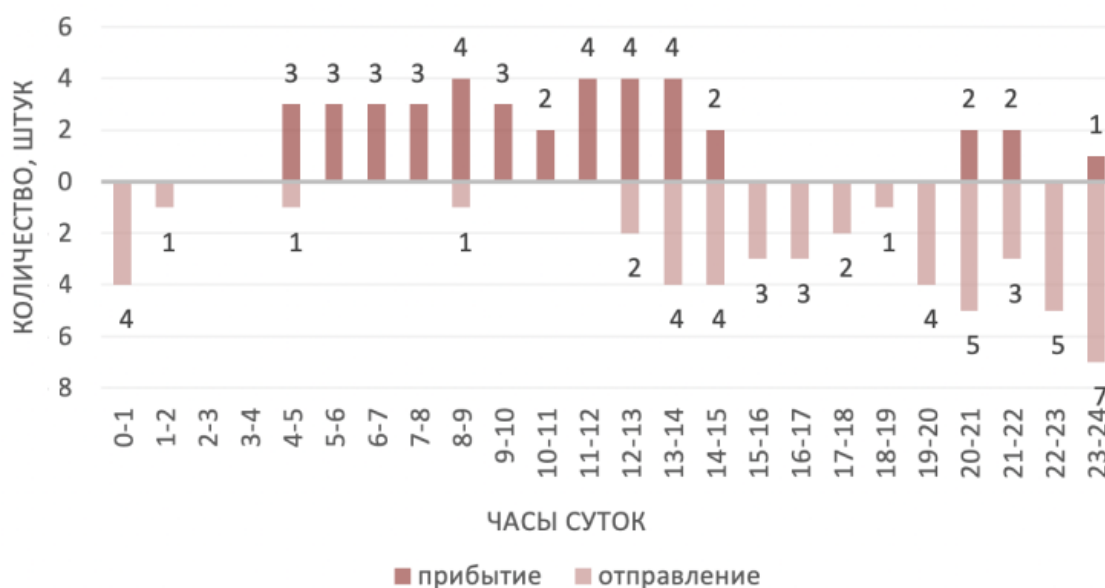


Рис. 3. Распределение прибытия и отправления дальних поездов по часам суток

На Рис. 2 показано, что прибытие и отправление пригородных поездов сосредоточено в утренние и вечерние часы. На Рис. 3 показано, что поезда дальнего следования в Санкт-Петербург прибывают в основном в первой половине дня, а отправляются во второй.

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ СТАНЦИЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГ-ГЛАВНЫЙ И САНКТ-ПЕТЕРБУРГ-ТОВАРНЫЙ-МОСКОВСКИЙ

В связи с необходимостью приёма/отправления высокоскоростных поездов при устройстве конечного терминала ВСЖМ-1 со строительством 6 путей на территории перронного парка станции Санкт-Петербург-Главный необходима реконструкция станции. Анализ вариантов реконструкции станций Санкт-Петербург-Главный и Санкт-Петербург-Товарный-Московский по которым были построены масштабные планы и подробные суточные планы-графики представлен в Табл. 1.

Таблица 1. Варианты реконструкции станций Санкт-Петербург-Главный и Санкт-Петербург-Товарный-Московский

Основные параметры схем реконструкции	Варианты реконструкции станций Санкт-Петербург-Главный и Санкт-Петербург-Товарный-Московский		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Число главных путей / в том числе для ВСЖМ-1	4 / 2	6 / 2	5 / 2
Число перронных путей, оставшихся для приёма/отправления поездов дальнего следования и скорых пригородных поездов 7000-й нумерации	6	10	10
Без дополнительных путепроводов, развязывающих поездопотоки на подходах к станции	да	—	да
Отсутствие реконструкции локомотивного депо	да	—	—
Отсутствие реконструкция технических парков	да	—	—
Технологии обслуживания составов пассажирских поездов дальнего следования	существующая	изменение технологии работы «Ранжирного» и «Нового» парков и сосредоточению практически всей работы по подготовке составов в рейс в парках «Э» и в «А-Н»	
Освоение размеров движения, предусмотренных графиком движения на 2030	частично	полностью	полностью
Частичное сохранение складов Кокорева	да	—	—

Во всех предложенных вариантах реконструкции главные пути, предназначенные для приёма/отправления высокоскоростных поездов

полностью изолированы от перронного парка станции Санкт-Петербург-Главный. В связи с этим отсутствует вариантность технологии в обслуживании высокоскоростных, дальних и пригородных поездов.

При реконструкции станций Санкт-Петербург-Главный и Санкт-Петербург-Товарный-Московский по **варианту 1**, предусмотрено исключение из работы станции 5 перронных путей (с 1 по 5), а также I и III главных путей от о.п. Фарфоровская до перронного парка для движения по ним высокоскоростных поездов. Таким образом, для освоения заданных размеров движения планируется использовать 6 перронных путей (с 6 по 11) с прибытием и отправлением по пути II и переложенному пути 3т.

В связи с чем, из-за ограничений вместимости перронных путей станции Санкт-Петербург-Главный и наличия враждебных маршрутов приема/отправления поездов, перестановки составов и подачи/уборки поездных и маневровых локомотивов в горловине приемоотправочного парка, невозможно обслужить все скоростные пригородные поезда 7000-й нумерации.

По **вариантам 2 и 3** реконструкции станций Санкт-Петербург-Главный и Санкт-Петербург-Товарный-Московский предусмотрено исключение из работы станции 1 перронного пути, а также I и III главных путей от о.п. Фарфоровская до перронного парка. Таким образом, для освоения заданных размеров движения планируется использовать 10 перронных путей (с 1 по 11) с прибытием и отправлением по путям II и 3т и по двум дополнительным главным путям, уложенных по территории технических парков.

При этом размеры работы, предусмотренные графиком движения поездов на 2030 будут освоены в полном объеме. Однако из-за укладки двух дополнительных главных путей по территории технических парков, и в связи с этим сокращения числа путей на которых велась подготовка составов, ликвидации вытяжных путей и прямого выхода со второго по шестой путей Нового парка, необходим перенос практически всей работы по подготовке составов пассажирских поездов в рейс в парки «Э» и «А-Н» и задействования практически всех имеющихся в них резервов, в связи с этим будет отсутствовать возможность обрабатывать поезда с Дачи Долгорукова (за исключением готовящихся в ночной период). Стоит отметить, что укладка дополнительных главных путей по территории технических парков значительно ухудшает технологию работы станций и освоить перспективные размеры движения удастся только за счет имеющихся резервов и наличия 10 перронных путей.

Таким образом, реконструкция станций по **варианту 1** не позволят освоить перспективные размеры движения, а по **вариантам 2 и 3**, помимо необходимости реконструкции локомотивного депо и технических парков (а во варианте 2 и устройства дополнительного путепровода) приводит к необходимости демонтажа складов Кокоревых. В связи с этим возникает

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СТАНЦИЙ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ-ГЛАВНЫЙ И САНКТ-ПЕТЕРБУРГ-
ТОВАРНЫЙ-МОСКОВСКИЙ**

Фрагменты графика исполненной работы и графика движения поездов, моделируемых в системе ИМЕТРА, полученные в результате проведенных экспериментов с моделью работы станции Санкт-Петербург-Главный, на размеры движения и расписание прибытия/отправления поездов по перспективному графику на 2030 год, приведены на Рис. 4 и Рис. 5 соответственно.

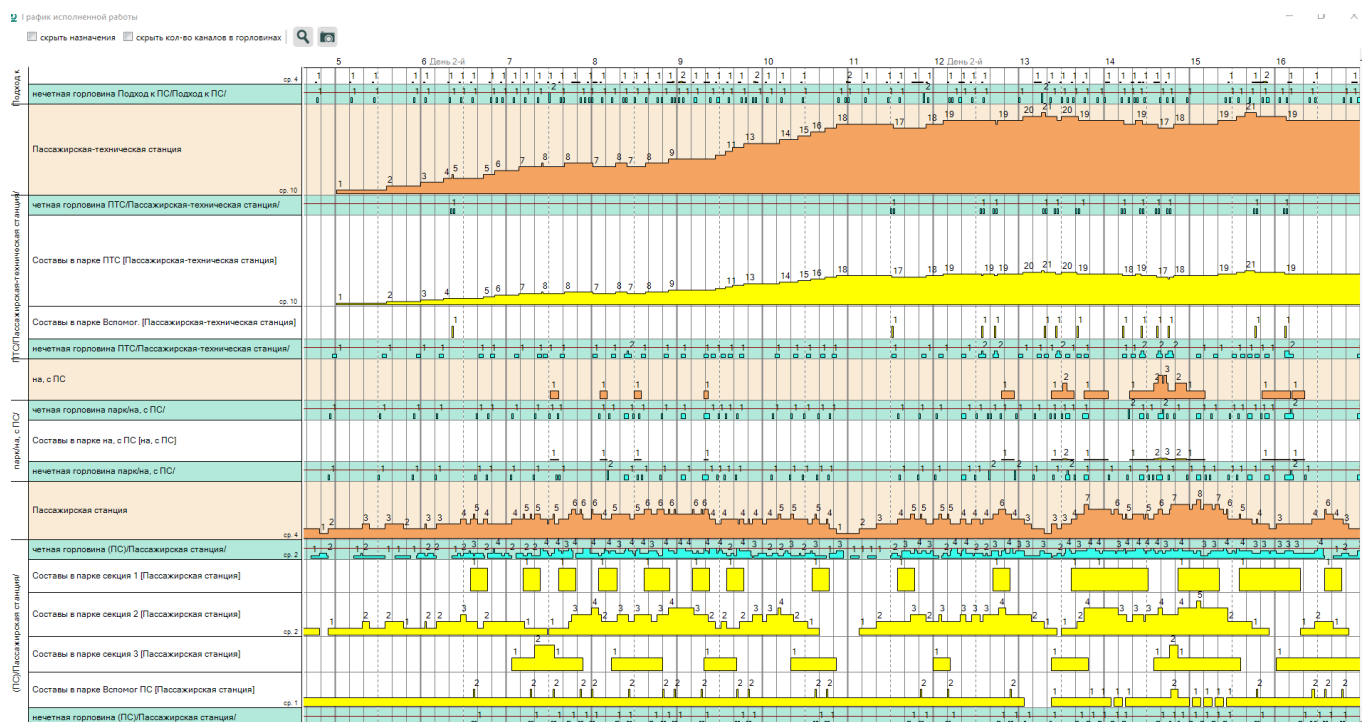


Рис. 4. Фрагмент графика исполненной работы транспортной системы станции Санкт-Петербург-Главный, моделируемого в программе ИМЕТРА

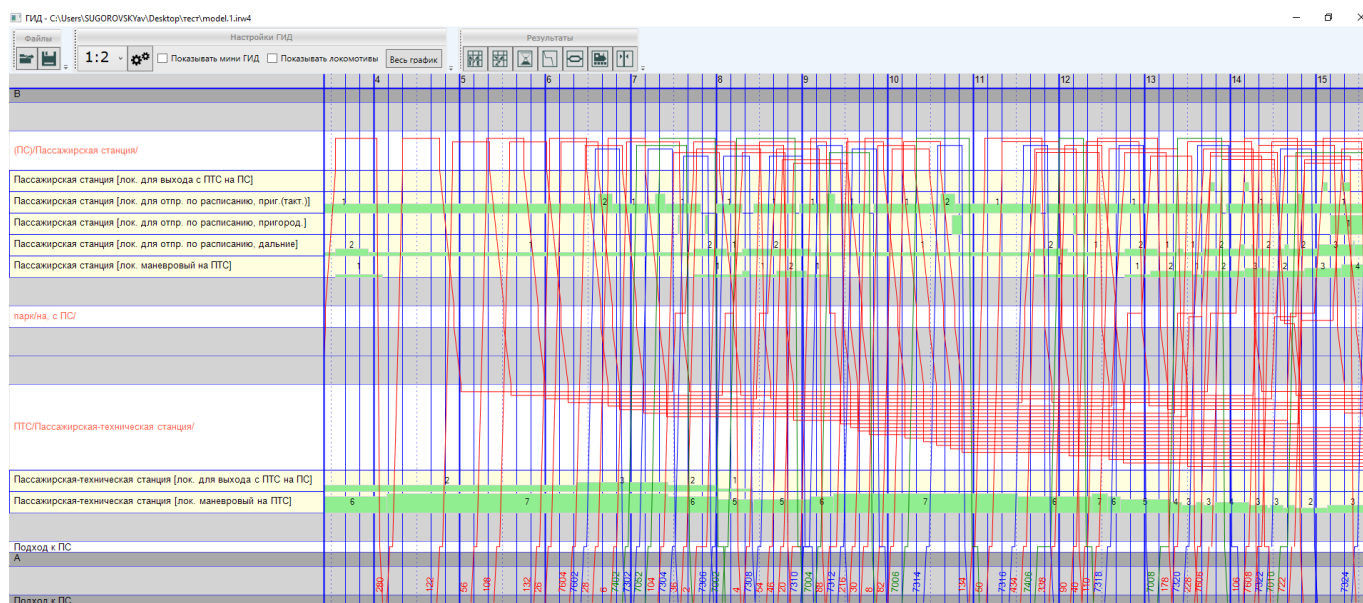


Рис. 5. Фрагмент графика движения поездов транспортной системы станции Санкт-Петербург-Главный, моделируемого в программе ИМЕТРА

В результате экспериментов с моделью установлено, что для освоения размеров работы, предусмотренных графиком движения поездов на 2030 год, в перронном парке необходимо не менее 8 путей. При этом изменение путевого развития других парков не требуется. Однако, из-за изъятия I и III главных путей от о.п. Фарфоровская до перронного парка для движения по ним высокоскоростных поездов и имеющихся враждебных передвижениях в горловине перронного парка для части пригородных поездов требуется корректировка расписания, либо необходимость их приема/отправления в перронный парк станции по путям, предназначенных для движения высокоскоростных поездов. Для этого необходима укладка съездов в горловине перронного парка и на участке Навалочная – Фарфоровская, при этом будет обеспечена вариантность технологии в обслуживании высокоскоростных, дальних и пригородных поездов. Для проверки возможности укладки необходимых съездов и взаимозаменяемости путей построен масштабный план реконструкции станций Санкт-Петербург-Главный и Санкт-Петербург-Товарный-Московский с 8-ю перронными путями для дальних и пригородных поездов и 6-ю – для высокоскоростных поездов. Реконструкция по этому варианту, без необходимости реконструкции локомотивного депо и технических парков, позволит полностью освоить перспективные размеры движения, а также частично сохранить склады Кокоревых.

ВЫВОДЫ

В результате анализа трех вариантов реконструкции станций Санкт-Петербург-Главный и Санкт-Петербург-Тов.-Московский, необходимой в связи строительства высокоскоростной магистрали Санкт-Петербург – Москва (ВСЖМ-1) и устройством конечного терминала ВСЖМ-1 на территории перронного парка станции Санкт-Петербург-Главный, анализа технологии работы и путевого развития станций и имитационного моделирования их работы в системе ИМЕТРА, определено необходимое и достаточное путевое развитие станций, а также предложен вариант реконструкции, уложенный в масштаб.

Реализация предложенного варианта реконструкции перронного парка станции Санкт-Петербург-Главный позволит, без необходимости реконструкции локомотивного хозяйства и технических парков, частично сохранить склады Кокоревых, включенные в список объектов культурного наследия.

Авторы заявляют что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. «Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» [Order of the Government of the Russian Federation of 27 November 2021. "Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035". (In Russ.)]. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> Дата обращения: 25.09.2023.
2. Новости Петербурга: Градозащитники не исключают еще одну «яму» вместо магистрали на месте складов Кокоревых. [PETERBURG NEWS: City defenders do not rule out another "pit" instead of a highway at the site of the Kokorev warehouses. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 25.09.2023. Доступно по: <https://peterburg-news.ru/2023/02/13/gradozashhitniki-ne-isklyuchayut-eshhe-odnu-yamu-vmesto-magistrali-na-meste-skladov-okorevyh/?ysclid=lmynbjz2m840853693>
3. Сугоровский А.В., Сугоровский А.В. Типовой имитационный пассажирский модуль для комплексного исследования железнодорожных направлений, узлов и станций // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 57–65. [Sugorovsky AV, Sugorovsky AV. A typical simulation passenger module for a comprehensive study of railway directions, junctions and stations. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):57-65. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20239257-66
4. Kozlov PA, Vakulenko SP, Kozlova VP. Railway junctions from the standpoint of a systematic approach. *Bulletin of the Rostov State University of Railways*. 2021;3(83):124-130. doi: 10.46973/0201-727X_2021_3_124
5. Kolokolnikov VS, Slobodyanyuk IG. Technology of polygons macromodelling.

- Transport of the Urals*. 2019;3(62):48-51. doi: 10.20291/1815-9400-2019-3-48-51
6. Slobodyanyuk IG. Functional approach to modeling of transport systems. *Transport of the Urals*. 2017;2(53):96-101. doi: 10.20291/1815-9400-2017-2-96-101
 7. Borodin AF, Kravchenko AA, Nikolaev KY, et al. Metody gibridnoy tekhnologii imitatsionnogo modelirovaniya pri vybore variantov rekonstruktivnykh meropriyatiy po razvitiyu zheleznodorozhnykh napravleniy i krupnykh uzlov. Proceedings of the Fourteenth International Conference "Management of Large-scale Systems Development (MLSD'2021)". 2021:963-971. doi: 10.25728/4783.2021.67.10.001
 8. Дмитриев Е.О. Методы обоснования вариантных технологических режимов работы полигонов железнодорожной сети // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». – 2021. – № 6. – С. 26–38. [Dmitriev EO. Substantiation methods of alternative technological modes of railway network polygons operation. *Byulleten uchenogo soveta JSC IETD*. 2021;6:26-38. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 25.04.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46279751>
 9. Petrov AS, Dmitriev EO, Nikolaev KY. Tipovyye moduli imitatsionnogo rascheta krupnykh zheleznodorozhnykh uzlov. Proceedings of the Twelfth International Conference Managing the Development of Large-scale Systems (MLSD'2019). 2019:633-644. doi: 10.25728/mlsd.2019.2.0633
 10. Горбунов Г.Г., Рубцов Д.В., Смирнов А.Е. Развитие математических моделей и программных средств для разработки схем размещения и развития сортировочных станций / Труды восьмой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019)». 21 ноября 2019 года: М.: АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», 2019. – С. 193–195. [Gorbunov GG, Rubtsov DV, Smirnov AE. Development of mathematical models and software tools for the development of schemes for the placement and development of marshalling yards / Proceedings of the eighth Scientific and Technical Conference "Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZHT-2019)". November 21, 2019: Moscow: Joint-Stock Company "Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport", 2019. Pp. 193-195 (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42428821> Ссылка активна на 25.09.2023.
 11. Козлов П.А., Тушин Н.А., Пермикин В.Ю., Слободянюк И.Г. Технология макро моделирования транспортных узлов // Транспорт Урала. – 2014. – № 3(42). – С. 3–6. [Kozlov PA, Tushin NA, Permikin VYu, Slobodyanyuk IG. Transport hub macromodelling technology. *Transport of the Urals*. 2014;3(42):3-6. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 25.09.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22369704>
 12. Kozlov PA, Kolokolnikov VS, Kopylova EV. About simulation modeling and simulation systems. *Transport of the Urals*. 2019;1(60):3-6. doi: 10.20291/1815-9400-2019-1-3-6.
 13. Николаев К.Ю., Петров А.С. Комплексная модель Санкт-Петербургского железнодорожного узла / Труды IV Международная научно-практическая конференция «Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах» (РИЛТТРАНС-2021) 06–08 октября 2021 года; Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2022. – С. 108-117 [Nikolaev KYu, Petrov AS. Complex model of the St. Petersburg railway junction. Proceedings of the IV International Scientific

and Practical Conference "Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems" (REALTTRANS-2021) 06-08 October 2021; St. Petersburg: St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, 2022. pp. 108-117. (In Russ.)). Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50330360> Ссылка активна на 25.09.2023.

14. Panin VV, Novikov PO, Podorin AA, et al. Predictive modeling of rail transport in the medium term with forecasting of production and economic indicators. *Large-scale Systems Development Management (MLSD'2021)*. doi: 10.25728/9803.2021.57.89.001
15. Бородин А.Ф., Николаев К.Ю., Дмитриев Е.О. и др. Опыт применения в прикладных разработках и пути развития системы имитационного моделирования железнодорожных узлов и направлений // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». – 2023. – № 8-1. – С. 14–34. [Borodin AF, Nikolaev KYu, Dmitriev EO, et al. Experience in the use of simulation modeling system for railway junctions and directions in application development and development trends. *Bulletin of the scientific council of JSC IETD*. 2023;8-1:14-34. (In Russ.)]. Доступно по: https://elibrary.ru/download/elibrary_54141465_31852853.pdf Ссылка активна на: 25.09.2023.

Сведения об авторах:

Сугоровский Артём Васильевич, кандидат технических наук;

eLibrary SPIN:5575-3221; ORCID: 0000-0001-6955-814X;

E-mail: c123945@yandex.ru

Сугоровский Антон Васильевич, кандидат технических наук;

eLibrary SPIN:6572-5865; ORCID: 0000-0001-5930-1789;

E-mail: gthdsq555@yandex.ru

Information about the authors:

Artyom V. Sugorovsky, Candidate of Engineering Science;

eLibrary SPIN:5575-3221; ORCID: 0000-0001-6955-814X;

E-mail: c123945@yandex.ru

Anton V. Sugorovsky, Candidate of Engineering Science;

eLibrary SPIN:6572-5865; ORCID: 0000-0001-5930-1789;

E-mail: gthdsq555@yandex.ru

Цитировать:

Сугоровский А.В., Сугоровский А.В. Применением имитационного моделирования при выборе варианта реконструкции станции Санкт-Петербург-Главный в связи с вводом ВСЖМ-1 // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 18–29. doi: 10.17816/transsyst20239419-29

To cite this article:

Sugorovsky AV, Sugorovsky AV. The use of simulation modeling when choosing the option of reconstruction of the St. Petersburg-Main station in connection with the commissioning of HSH-1. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(4):18-29. doi: 10.17816/transsyst20239418-29

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

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

УДК [UDC] 699.852

DOI 10.17816/transsyst20239430-45

© А.Э. Юницкий^{1,2}, Р.А. Шаршов¹, М.И. Цырлин¹

¹ЗАО «Струнные технологии»

²ООО «Астроинженерные технологии»

(Минск, Республика Беларусь)

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОПОР РЕЛЬСО-СТРУННОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ В ЦЕНТРЕ uSky В ШАРДЖЕ (ОАЭ)

В работе представлен расчет прочности общей схемы и узлов промежуточных опор рельсо-струнной путевой структуры в Центре uSky в Шардже (ОАЭ).

Цель: Расчет прочности промежуточных опор при воздействии комплекса нагрузок от путевой структуры, транспортного средства и ветровой нагрузки.

Методы: Расчет производился методом конечных элементов при помощи программ – Midas Gen и ANSYS.

Результаты: Анализ результатов расчета показал достаточную надежность всех элементов промежуточных опор.

Ключевые слова: рельсо-струнная путевая структура, uSky, промежуточная опора, конструкция, расчетная модель, прочность, напряжения.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

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

© A.E. Unitsky, R.A. Sharshov, M.I. Tsyrlin

Unitsky String Technologies, Inc.

(Minsk, Republic of Belarus)

EVALUATION OF STRENGTH OF INTERMEDIATE SUPPORTS OF STRING RAIL TRACK STRUCTURE AT uSky CENTER IN SHARJAH (UAE)

The paper presents strength analysis of the general arrangement and units of intermediate supports of the string rail track structure at the uSky Center in Sharjah (UAE).

Aim: Strength analysis of intermediate supports under the impact of a complex of loads from the track structure, vehicle and wind load.

Methods: The calculation was performed using the finite element method using Midas Gen and ANSYS programs.

Results: Analysis of the calculation results showed sufficient reliability of all elements of the intermediate supports.

Key words: string rail track structure, uSky, intermediate support, structure, analysis model, strength, stresses.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Тестовый участок № 1 рельсо-струнной путевой структуры с гибким рельсом в Центре uSky в Шардже (ОАЭ) – инженерное сооружение, состоящее из трех пролетов эстакадной части. Эстакадная часть представляет из себя сваренный поперечными швами U-образный профиль с канатами, размещенными внутри него (далее по тексту – рельс). Эстакада закреплена на промежуточных опорах через шарнирные узлы и на анкерных опорах через жесткие элементы, длина центрального пролета составляет 200 м, двух крайних – по 100 м [1]. Анкерные опоры несут горизонтальную нагрузку от натяжения эстакадной части – канатов и U-образного профиля. Промежуточные опоры воспринимают вертикальную нагрузку от веса путевой структуры, транспортных модулей [2] и ветровые воздействия. Анкерные опоры тестовой трассы № 1 изготовлены из монолитного железобетона, промежуточные опоры – из круглых стальных труб с оттяжками (для улучшения дизайна опор).

Путевая структура предназначена для перемещения грузовых и пассажирских транспортных средств [3]; рассчитана для эксплуатации в условиях тропического климата.

Целью работы являлась оценка несущей способности промежуточных опор рельсо-струнной путевой структуры в Центре uSky в Шардже (ОАЭ).

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Для выполнения расчета строились две математические модели. Первая модель выполнена в пакете программного обеспечения Midas Gen 2018 v2.1 для проверки прочности и устойчивости принятых сечений требованиям [4] (Рис. 1), вторая – в пакете программного обеспечения Ansys 19.1 для проверки не типовых узлов и элементов конструкций (Рис. 2).

Модель № 1 в Midas Gen выполнена стержневыми элементами. Основное сечение опоры – труба 450x12 – обычные балочные элементы. Элементам заданы параметры стали S355 с модулем упругости 205 ГПа.

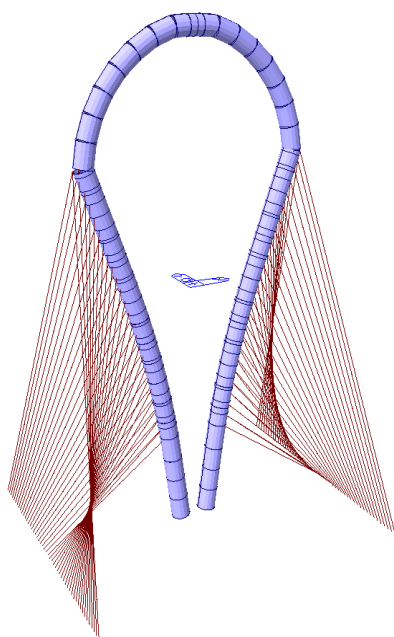


Рис. 1. Расчетная модель № 1



Рис. 2. Расчетная модель № 2

Оттяжки (канаты двойной свивки диаметром 8 мм) – элементы, работающие только на растяжение с приведенным сечением – 5,37 мм и модулем упругости 127 ГПа. Закрепления – по низу основного сечения жесткое защемление в двух плоскостях; канаты – шарнирное закрепление в уровне крепления к фундаменту. В уровне крепления седла к промежуточной опоре модель закреплена по перемещениям из плоскости основной несущей рамы конструкции.

Модель № 2 в Ansys выполнена полностью объемными конечным элементами, за исключением канатов оттяжек – они выполнены стержневыми элементами. Модули упругости элементов приняты также, как и в модели, выполненной в Midas Gen. Закрепления – по типу fixed support по фундаментным болтам, и опора типа compression only в уровне фундаментной пластины.

Узлы базы и крепления седла к промежуточной опоре показаны на Рис. 3 и Рис. 4.

Узел крепления седла представляет собой интерес с точки зрения строительной механики. В общем виде узел относится к фланцевым, с дополнительной центральной пластиной, на которую передается основная вертикальная нагрузка. Дополнительную жесткость в узле создает бетон, которым заполнены трубы, формирующие силовой каркас опоры. Также, в узле включены в работу короткие двутавровые балки – с одной стороны они приварены к пластинам фланцев изнутри, а с другой – передают изгибающие нагрузки на бетон, находящийся внутри опоры, обеспечивая прочность и жесткость узла, превосходящие все типовые варианты, возможные для размещения в заданных габаритах.

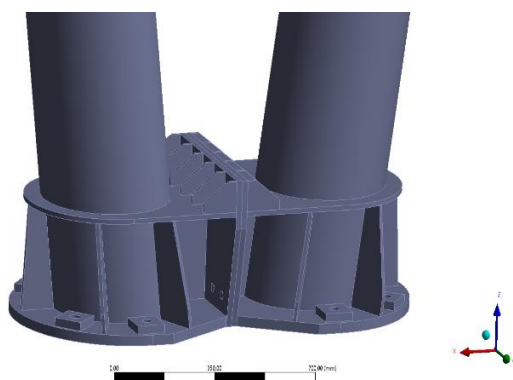


Рис. 3. Опорный узел опоры

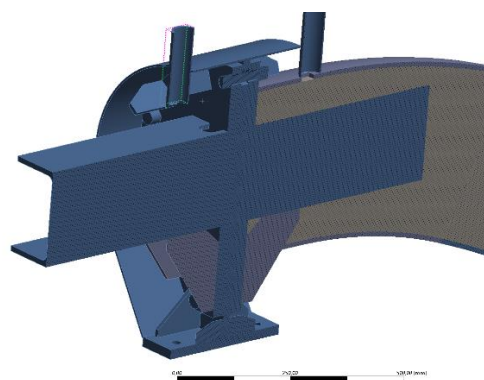


Рис. 4. Узел крепления седла к промежуточной опоре

В расчетной модели моделируется и создается начальное состояние конструкции. В качестве начального состояния рассматривалось равновесное состояние конструкции после натяжения всех вант, равномерно, на 8800 Н каждая при температуре $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такое начальное усилие позволит сохранить натяжение вант при расчетном сочетании нагрузок при $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и избежать избыточных деформаций и потери формы поверхности, создаваемой вантами.

РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ ПО ДЕФОРМАЦИЯМ МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ, МОДЕЛЬ № 1

Максимальное значение вертикальной деформации промежуточной опоры в начальном состоянии наблюдается в верхней части трубы и составляет 10,6 мм (Рис. 5); максимальные значения горизонтальных деформаций приходятся в плоскости рамы и составляют 19,5 мм (Рис. 6).

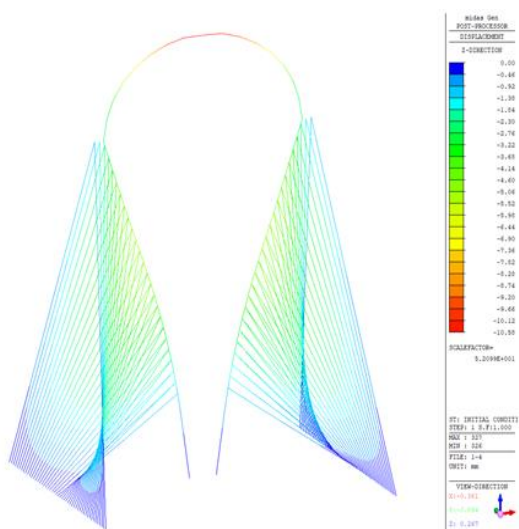


Рис. 5. Вертикальные деформации конструкции

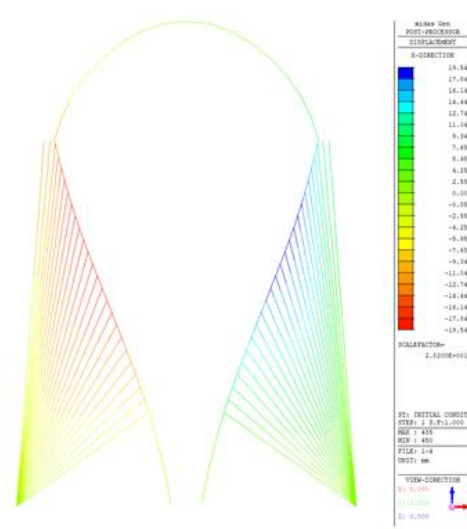


Рис. 6. Горизонтальные деформации в плоскости рамы

Максимальные перемещения соответствуют заданному перемещению конструкции от воздействия транспортного средства в середине пролета и составляют 25,0 мм; максимальное значение горизонтального перемещений верха опоры от максимального ветра в плоскости рамы – 7,6 мм. Деформации конструкции в верхней точке составляют 1/1370 от высоты опоры, в месте максимальных деформаций – 1/440 от высоты опоры (Рис. 7).

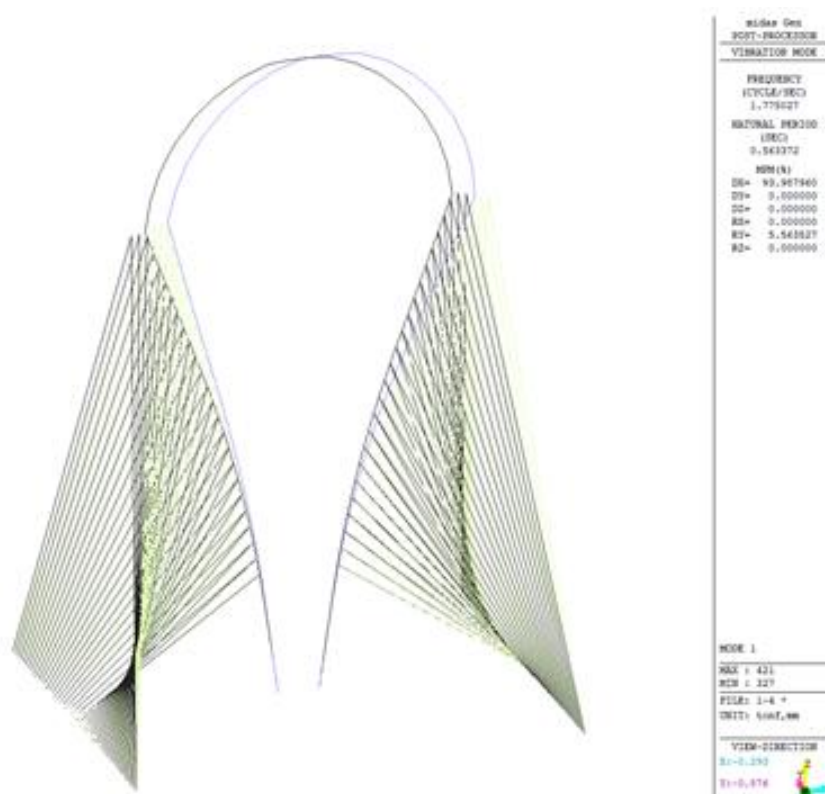


Рис. 7. Первая форма собственных колебаний, частота – 1,77 Гц

Первая частота собственных колебаний включает в себя 93,4 % модальной массы на частоте 1,77 Гц. Форма колебаний – преимущественно изгибная, кручение – минимальное. Кручение блокируется канатами оттяжек, которые дают значительную жесткость конструкции, кроме того, основное сечение рамы – труба-бетон, что дает огромную локальную жесткость в узлах.

РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ ПО ПРОЧНОСТИ, МОДЕЛЬ №1

Канат, принятый в конструкции – 8.1-Г-1-С-Н-1570 по ГОСТ 3070-88, с расчетным сопротивлением не менее 1570 МПа и разрывным усилием каната в целом ($N_{t.Rd}$) не менее 30450 Н. Наихудшим сочетанием, при котором возникает максимальное разрывное усилие в оттяжке – при воздействии ветра под углом 45° к оси путевой структуры.

Продольные усилия в оттяжках (N_{ed}): минимальное – 4554 Н; максимальное значение – 11213 Н.

Согласно пункту 6.2.3 [5] условие прочности для канатов имеет вид: $\frac{N_{ed}}{N_{t.Rd}} \leq 1$; в данном случае: $\frac{11213}{30450} = 0,37 \leq 1$ условие прочности выполняется. Коэффициент использования сечения составляет 0,87.

Максимальный момент возникает в месте передачи нагрузки от путевой структуры на конструкцию опоры и составляет 600 кН·м (Рис. 8); максимальные растягивающие усилия – в месте передачи нагрузки – от путевой структуры на конструкцию опоры и составляет 129 кН. Сжимающие усилия в месте передачи нагрузки от опоры на фундаменты – 558 кН (Рис. 9).

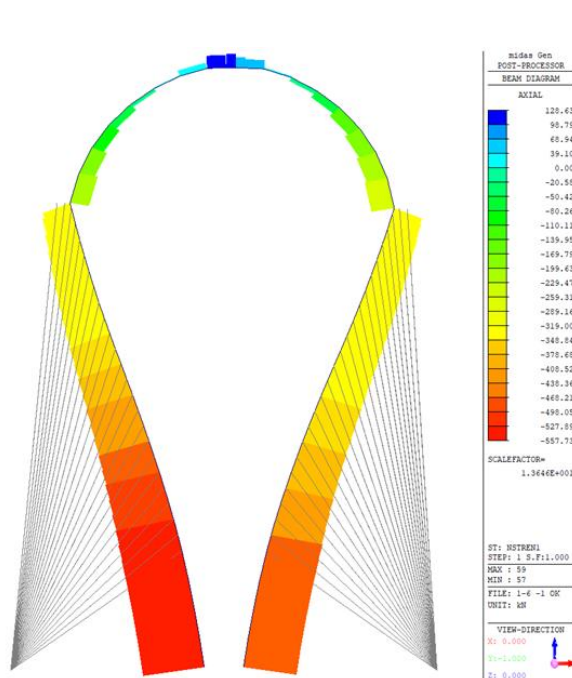


Рис. 8. Распределение продольных сил по конструкции промежуточной опоры

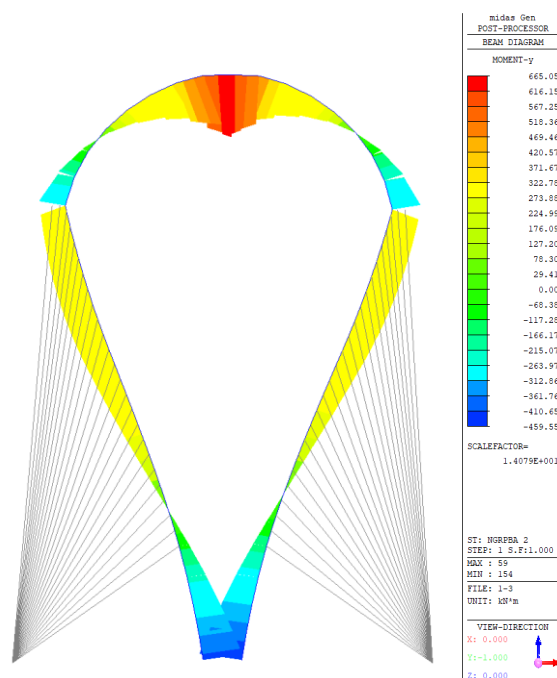
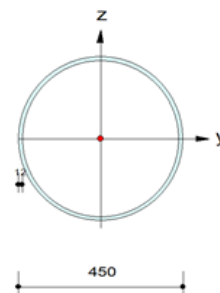


Рис. 9. Распределение моментов сил по конструкции промежуточной опоры

Исходя из проверок сечений, выполненных согласно [5] (Рис. 10), был сделан вывод о достаточной прочности сечений промежуточной опоры.

1. Design Information

Design Code : Eurocode3
 Unit System : N, mm
 Member No : 59
 Material : S355 (No:1)
 (Fy = 355.000, Es = 210000)
 Section Name : O 450x12 (No:1)
 (Built-up Section).
 Member Length : 167.883



2. Member Forces

Axial Force Fxx = 161217 (LCB: 2, POS:I)
 Bending Moments My = 665045340, Mz = 0.00000
 End Moments Myi = 665045340, Myj = 632247185 (for Lb)
 Myi = 665045340, Myj = 632247185 (for Ly)
 Mzi = 0.00000, Mzj = 0.00000 (for Lz)
 Shear Forces Fyy = 0.00000 (LCB: 3, POS:1/2)
 Fzz = 206111 (LCB: 1, POS:J)

Outer Dia.	450.000	Wall Thick	12.0000
Area	16512.2	Asz	8256.11
Qyb	47997.0	Qzb	47997.0
Iyy	396268295	Izz	396268295
Ybar	225.000	Zbar	225.000
Wely	1761192	Welz	1761192
Iy	154.914	rz	154.914

3. Design Parameters

Unbraced Lengths Ly = 167.883, Lz = 167.883, Lb = 167.883
 Effective Length Factors Beta_y = 1.00, Beta_z = 1.00
 Equivalent Uniform Moment Factors Beta_my = 1.00, Beta_mz = 1.00

4. Checking Results

Slenderness Ratio
 $KL/r = 44.2 < 200.0$ (Memb:164, LCB: 15)..... O.K
 Axial Resistance
 $Nsd/Nt_Rd = 161217/5328941 = 0.030 < 1.000$ O.K
 Bending Resistance
 $Msd_y/M_Rdy = 665045340/743145382 = 0.895 < 1.000$ O.K
 $Msd_z/M_Rdz = 0/743145382 = 0.000 < 1.000$ O.K
 Combined Resistance (Tension+Bending)
 $Rmax1 = (Msd_y/Mny_Rd)^{\alpha} + (Msd_z/Mnz_Rd)^{\beta}$
 $Rten = Nsd/(A*fy/Gamma_M1)$
 $Rbend = Msd_y/(Wply*fy/Gamma_M0) + Msd_z/(Wplz*fy/Gamma_M0)$
 $Rmax = MAX[Rmax1, Rten+Rbend] = 0.925 < 1.000$ O.K
 Shear Resistance
 $Vsd_y/Vy_Rd = 0.000 < 1.000$ O.K
 $Vsd_z/Vz_Rd = 0.105 < 1.000$ O.K

Рис. 10. Проверка прочности сечений промежуточной опоры

РАСЧЕТ УЗЛОВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРЫ

В составе конструкции промежуточной опоры рассматривалось два узла — узел основания и узел крепления путевой структуры к промежуточной опоре — как наиболее интересные с точки зрения работы конструкции. Работа нижнего узла анализировалась без учета бетона внутри основной трубы несущей конструкции, работа верхнего узла — только с учетом бетона — для обеспечения устойчивости формы сечения.

Оценка напряжений в стальных элементах выполнялась путем анализа величин эффективных напряжений (напряжений по Мизесу). Критерий максимального напряжения по Мизесу основывается на теории Мизеса-Хенки (Mises-Hencky), также известной как теория энергии формоизменения.

Для главных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 напряжение по Мизесу выражается как

$$\sigma_{Mises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}}$$

Максимальные средние напряжения по конструкции составляют 278 МПа при расчетном сопротивлении стали, из которой изготовлена труба – 355 МПа (Рис. 11).

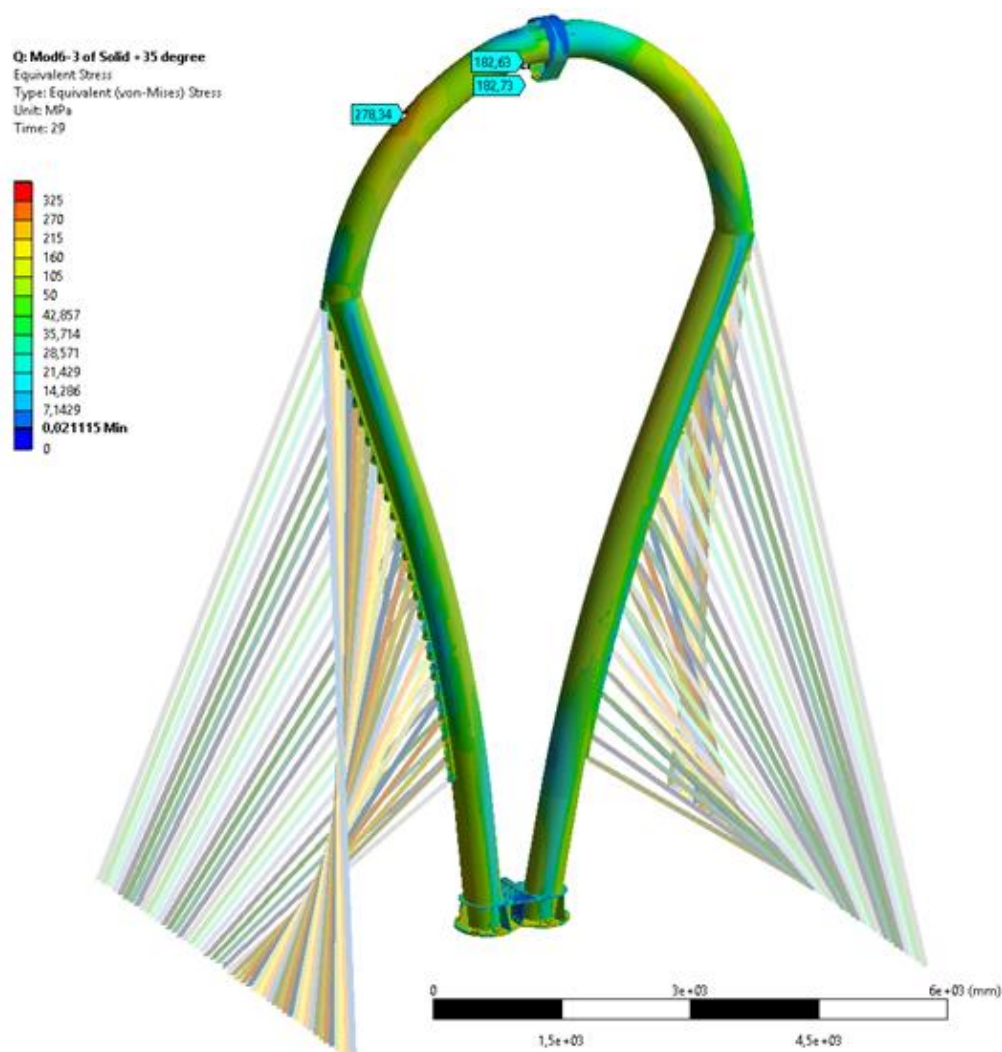


Рис. 11. Напряжения в конструкции по критерию Мизеса

Узел крепления путевой структуры к опоре.

Узел крепления путевой структуры к опоре рассматривался с точки зрения прочности только с учетом наличия бетона внутри основной трубы опоры. Узел рассчитывался на экстремальное воздействие при максимальной вертикальной нагрузке от транспортного средства и путевой структуры. Задача решалась в два этапа – на первом шаге моделировалось предварительное натяжение болтов, на втором шаге прикладывалась расчетная нагрузка.

Максимальные напряжения в узле конструкции опоры составляют 347 МПа в точке (Рис. 12).

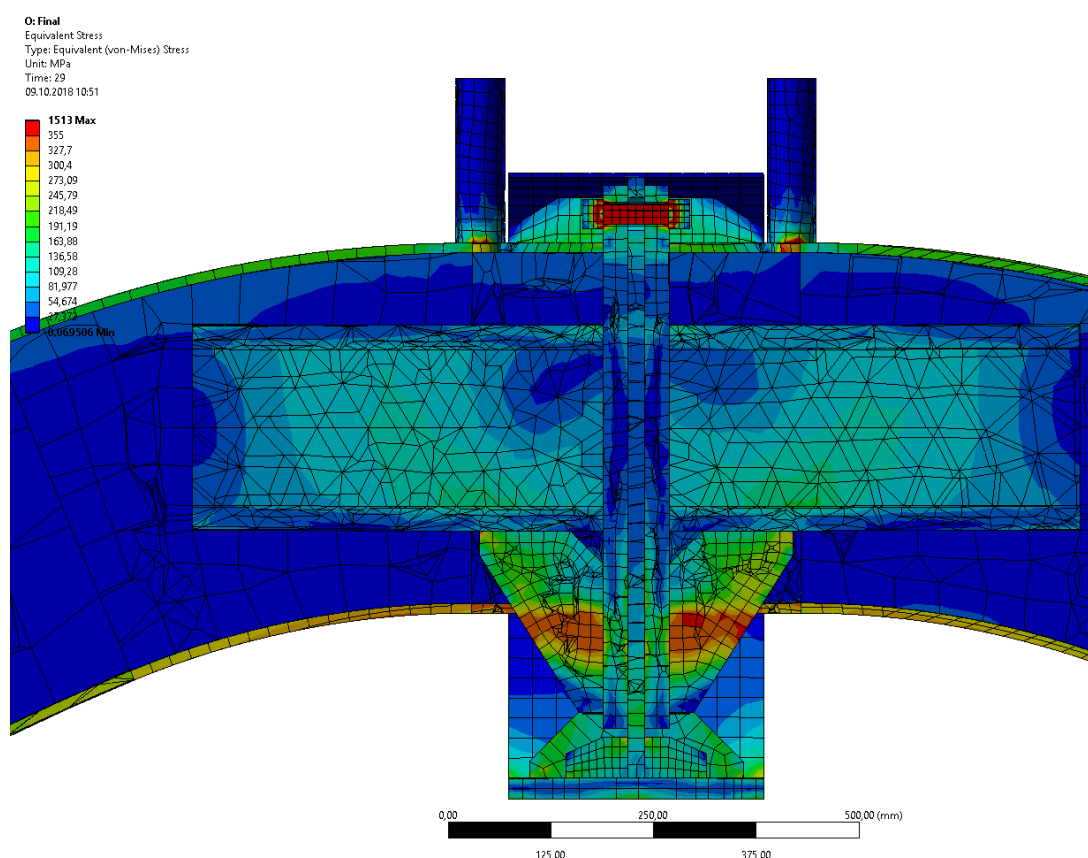


Рис. 12. Напряжения в узле конструкции опоры (разрез поперек опоры)

Максимальные напряжения в бетоне на главных площадках представлены на Рис. 13. Растяжение составляет 0,96 МПа, сжатие – 8,92 МПа. Расчетное сопротивление сжатию – не менее 25,0 МПа, расчетное сопротивление растяжению – не менее 1,8 МПа.

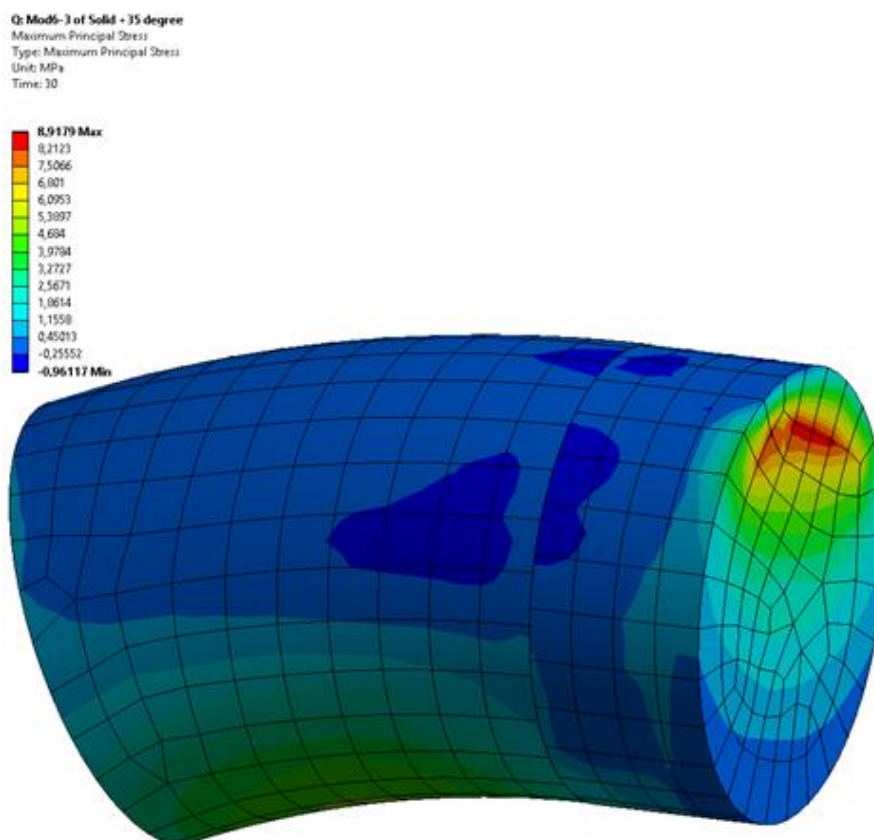


Рис. 13. Максимальные напряжения в бетоне на главных площадках
(двухтавр условно не показан)

Узел основания

Узел основания рассматривался без учета бетона внутри опоры. Задача решалась в два этапа – на первом шаге моделировалось предварительное натяжение болтов, на втором шаге прикладывалась расчетная нагрузка. Узел рассчитывался на экстремальное воздействие, при максимальной вертикальной нагрузке от транспортного средства и путевой структуры.

Напряжения в узле основания определялись по критерию Мизеса (Рис. 14, 15). Максимальные напряжения составляют 302 МПа в точке при расчетном сопротивлении не менее 355 МПа. Напряжения по болтам достигают 400 МПа, при прочности на разрыв – не менее 70 % от 1100 МПа, составляя 770 МПа.

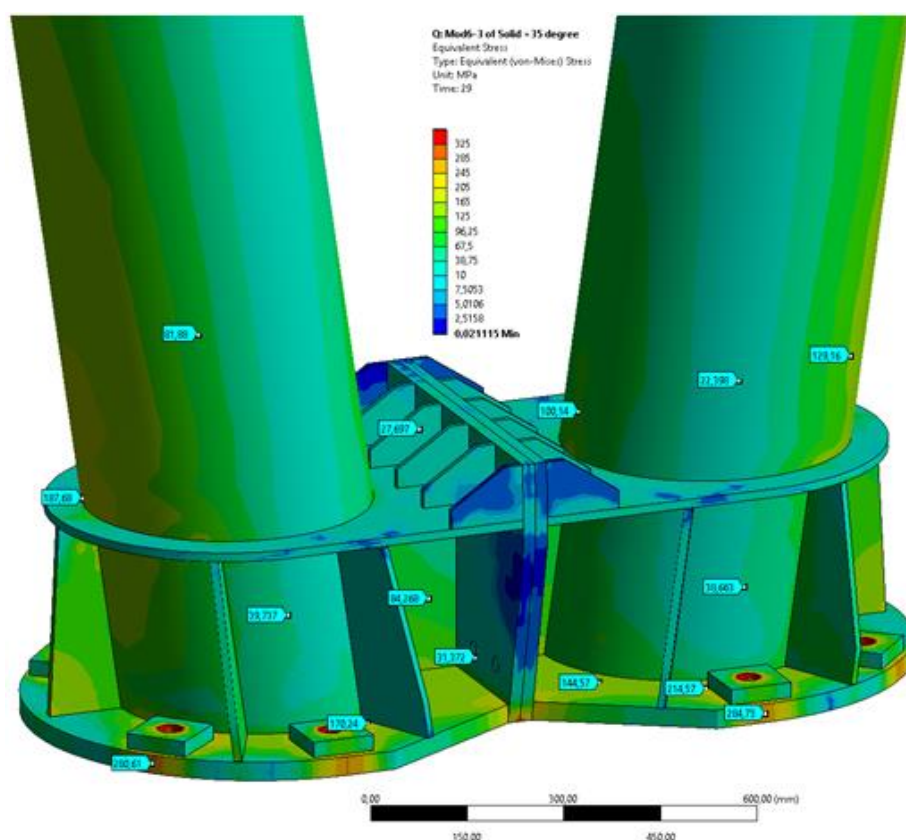


Рис. 14. Напряжения в узле основания

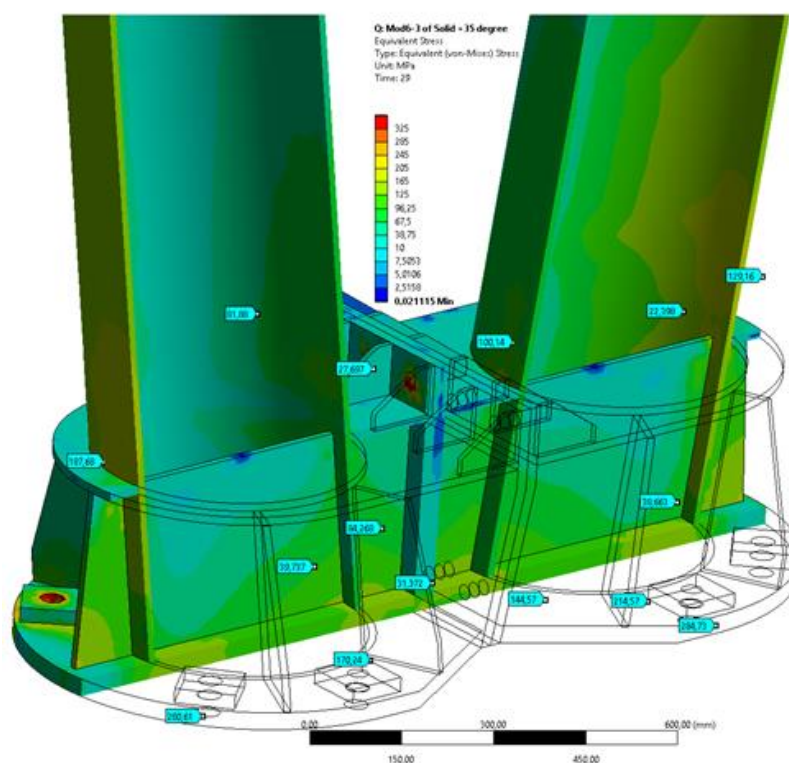


Рис. 15. Напряжения в узле основания (поперечное сечение трубы)

Процесс создания необходимого начального состояния.

Конструкция промежуточной опоры изначально рассматривалась как гибкая из-за недостаточной жесткости узла опирания по сравнению с верхней частью опоры, в которую передается нагрузка от путевой структуры. Для обеспечения необходимой частоты собственных колебаний и обеспечения жесткости конструкции проектировались оттяжки структуры и последовательность их натяжения (Рис. 16 и 17).

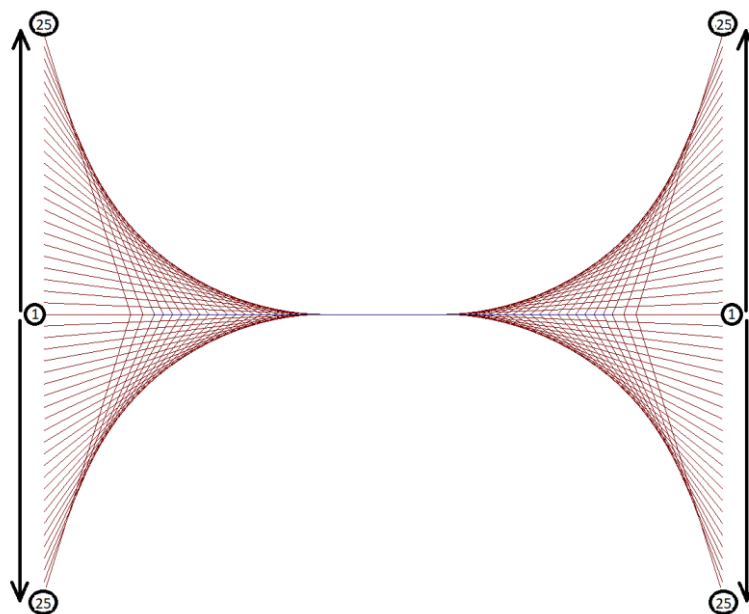


Рис. 16. План промежуточной опоры с указанием направления порядка натяжения

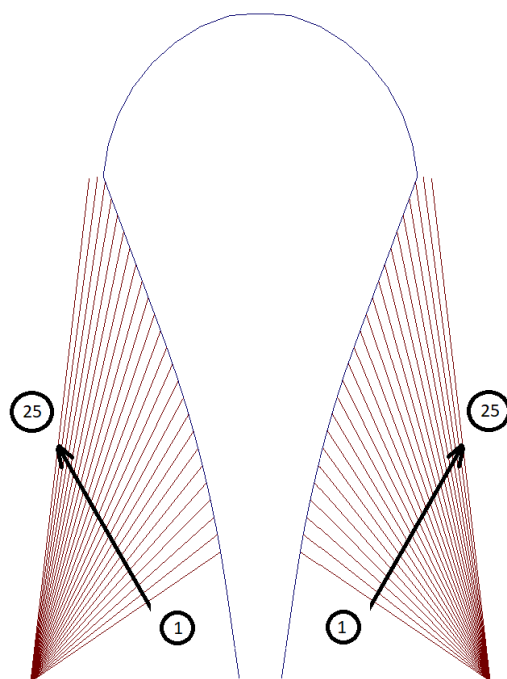


Рис. 17. Фасад опоры с указанием порядка натяжения

Натяжения производятся от центрального каната оттяжек (стоящей без угла в плане) до наиболее удаленного от нее. Такой порядок натяжения позволяет с наименьшей вероятностью получить отклонения в создании начального состояния промежуточной опоры для наиболее нагруженных оттяжек.

Канаты натягиваются по 4 шт. в диагональном порядке. Пример натяжения одного шага натяжения, состоящего из 4-х действий, показан на Рис. 18.

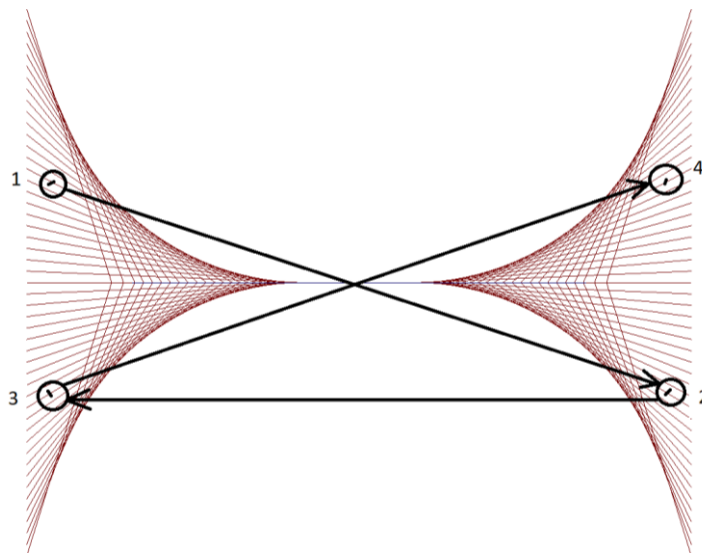
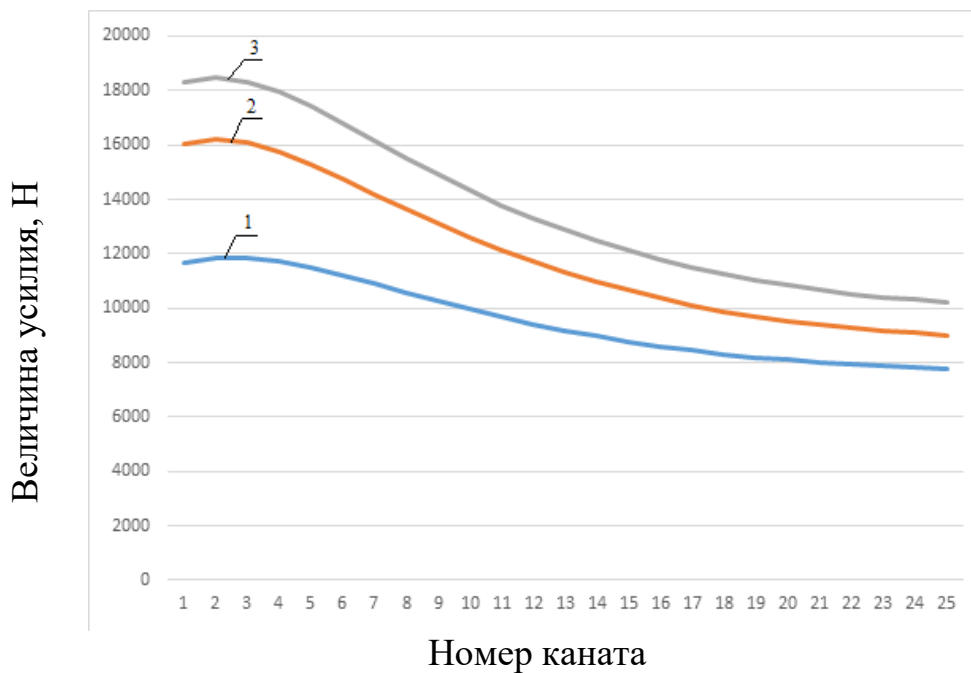


Рис. 18. Схема натяжения одного шага натяжения канатов

Величины натяжения канатов приведены на Рис. 19.



1 – при 0 °C; 2 – при +35 °C; 3 – при +70 °C

Рис. 19. Натяжения канатов, Н в зависимости от температуры и номера каната (оттяжки)

Представленные результаты позволили оценить прочность промежуточных опор при действии путевой структуры, транспортного средства, ветровой нагрузки.

Анализ результатов расчета показал высокую надежность конструкции промежуточной опоры, гарантирует безопасную эксплуатацию путевой структуры не менее 100 лет при круглогодичной эксплуатации с интервалом движения юнимобиля около 2 минут.

Выполненные расчеты были использованы при проектировании и строительстве тестового участка рельсо-струнной путевой структуры в Центре испытаний и сертификации uSky Transport в Шардже (ОАЭ) (Рис. 20).



Рис. 20. Гибкая рельсо-струнная путевая структура
в Центре uSky Transport в Шардже

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе произведен расчет прочности промежуточных опор при воздействии путевой структуры, транспортного средства, ветровой нагрузки. Анализ результатов расчета доказывает высокую надежность конструкции промежуточных опор.

Библиографический список / References

1. Юницкий А.Э., Хлебус А.С., Цырлин М.И. Оценка жесткости гибкого рельса и напряженно-деформированного состояния элементов рельсо-струнной путевой структуры в центре uSky в Шардже (ОАЭ) // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 45–62. [Yunitskii AE, Khlebus AS, Tsyrlin MI. Evaluation of flexible rail rigidity and stress-strain state of elements of string rail track structure at the uSky center in Sharjah (UAE). *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(3):45-62. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20228345-62
2. Юницкий А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе. – Силакросс: ПНБ принт, 2019. – 576 с. [Yunitskii AE. *Strunnye transportnye sistemy: na Zemle i v Kosmose*. Silakross: PNB print; 2019. 576 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.rulit.me/books/strunnye-transportnye-sistemy-na-zemle-i-v-kosmose-read-488548-1.html> Ссылка активна на: 26.09.2023.
3. Юницкий А.Э. Инновационные транспортно-инфраструктурные технологии uST / Альбом. – Минск: ЗАО «Струнные технологии», 2021. – 94 с. [Yunitskii AE. *Innovatsionnye transportno-infrastrukturnye tekhnologii uST*. Album. Minsk: Unitsky String Technologies, Inc.; 2021. 94 p. (In Russ.)]. doi: 10.20291/2311-164X-2022-2-3-7
4. ТКП EN 1992-1-1-2009. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. – Минск: Минстройархитектуры РБ, 2015. – 205 с. [TCCP EN 1992-1-1-2009. *Eurocode 2. Design of reinforced concrete structures. Part 1-1. General Building Rules and Regulations*. Minsk: Ministry of Construction and Architecture of the Republic of Belarus, 2015. – 205 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 21.11.2023. Доступно по: <https://studfile.net/preview/5617412/>
5. ТКП EN 1993-1-9-2009. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1–9. Усталостная прочность. – Минск: Минстройархитектуры РБ, 2010. – 43 с. [TCCP EN 1993-1-9-2009. *Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1–9. Fatigue strength*. Minsk: Ministry of Construction and Architecture of the Republic of Belarus, 2010. – 43 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 21.11.2023. Доступно по: <https://normy.by/tnpa/1/3402.pdf>

Сведения об авторах:

Цырлин Михаил Иосифович, кандидат технических наук, ведущий специалист;
eLibrary SPIN: 9548-6321; ORCID: 0000-0002-2983-3255
E-mail: m.tsirlin@unitsky.com

Юницкий Анатолий Эдуардович, председатель совета директоров, генеральный конструктор;
E-mail: a@unitsky.com

Шаршов Роман Александрович, начальник бюро;
E-mail: r.sharshov@unitsky.com

Information about the authors:

Michael I. Tsyrilin, Candidate of Technical Sciences, Leading Specialist
eLibrary SPIN: 9548-6321; ORCID: 0000-0002-2983-3255
E-mail: m.tsirlin@unitsky.com

Anatoli E. Unitsky, Chairman of the Board of Directors and General Designer
E-mail: a@unitsky.com

Roman A. Sharshov, Head of the bureau;
E-mail: r.sharshov@unitsky.com

Цитировать:

Юницкий А.Э., Шаршов Р.А., Цырлин М.И. Оценка прочности промежуточных опор рельсо-струнной путевой структуры в центре uSky в Шардже (ОАЭ) // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 30–45. doi: 10.17816/transsyst20239430-45

To cite this article:

Unitsky AE, Sharshov RA, Tsyrilin MI. Evaluation of the strength of intermediate supports string-rail track structure at the uSky center in Sharjah (UAE). *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(4):30-45. doi: 10.17816/transsyst20239430-45

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

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

УДК [UDC] 625.7/.8

DOI 10.17816/transsyst20239446-58

© Н.А. Ермошин, Д.Ю. Кириллова

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

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДОРОЖНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Цель: предлагается метод исследования долговечности дорожных сооружений в целях обеспечения надежности и безаварийной эксплуатации автомобильных дорог.

Материалы и методы: Задача оценки долговечности решается методами теории марковских случайных процессов.

Результаты: Результатом работы является математическая постановка задачи прогнозирования остаточного ресурса (долговечности) и способ ее решения.

Заключение: Метод позволяет обосновать варианты дорожно-мостовых конструкций, обладающих требуемой долговечностью при минимизации расхода ресурсов.

Ключевые слова: дорожные сооружения, автомобильная дорога, мост, долговечность, остаточный ресурс, надежность, содержание, эксплуатация.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

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

© N.A. Ermoshin, D.Yu. Kirillova

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

METHOD OF FORECASTING THE DURABILITY OF ROAD STRUCTURES

Aim: This article is proposed method for studying the durability of road structures in order to ensure reliability and accident-free operation of highways.

Materials and Methods: The problem of durability assessment is solved by methods of the theory of Markov random processes.

Results: The result of the work is a mathematical formulation of the problem of predicting the residual resource (durability) and a method for solving it.

Conclusion: The method makes it possible to justify options for road and bridge structures that have the required durability while minimizing resource consumption.

Key words: road structures, highway, bridge, durability, residual life, reliability, maintenance, operation.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие дорожной инфраструктуры, а также сохранение, поддержание и повышение технического уровня и эксплуатационного состояния существующей дорожной инфраструктуры является важной задачей. Для успешной реализации, сбалансированных по времени и выделяемым ресурсам перспективных программ содержания и развития дорожной инфраструктуры необходимо учитывать опыт разработки проектных решений по строительству и эксплуатации автомобильных дорог и искусственных сооружений [1–4]. Практика показывает, что зачастую межремонтные сроки службы дорожных и мостовых конструкций оказываются ниже проектных или нормативных [3–8]. В результате работа автомобильных дорог становится небезопасной, а преждевременное разрушение конструктивных элементов дорожных конструкций и сооружений является причиной дорожно-транспортных происшествий, аварий и катастроф [9–14]. По данным «НЦ БДД МВД России» ежегодно более 30 % ДТП связано с недостатками эксплуатационного состояния и обустройства улиц и дорог [15–17]. Подобные ситуации могут происходить из-за ошибок при проектировании, несоблюдения технологий выполнения работ по строительству, содержанию и ремонту, а также превышения расчетных параметров состава и интенсивности дорожного движения. Это приводит к преждевременному отказу дорожных и мостовых конструкций, что влечет причинение вреда жизни, здоровью и имуществу участников дорожного движения, окружающей среде, вызывает значительные экономические ущербы.

Вопросы повышения надежности и долговечности дорожных сооружений являются актуальными. Исследованию процессов снижения надежности работы автомобильных дорог и дорожных конструкций посвящены работы И.А. Золотаря, В.Д. Казарновского, В.К. Апестина, А.И. Васильева, Е.В. Угловой и др. [2–14, 18–22].

Для исключения или смягчения последствий отказов в работе автомобильных дорог необходимо своевременно выполнять мероприятия по поддержанию их параметров на уровне, обеспечивающем безопасную эксплуатацию. В связи с этим весьма важно иметь возможность расчета остаточного срока безопасной эксплуатации дорожных и мостовых конструкций с учетом расхода ресурсов (выделяемых средств) на поддержание их в работоспособном состоянии. Другими словами, необходим способ расчета остаточного ресурса дорожных и мостовых конструкций при ограничениях на выделяемые средства на их содержание и ремонты.

МЕТОДЫ

Рассмотрим математическую постановку задачи по определению остаточного срока службы (долговечности) дорожных и мостовых конструкций. При этом под их долговечностью будем понимать *свойство, позволяющее сохранять требуемые транспортно-эксплуатационные показатели автомобильной дороги при заданных условиях эксплуатации, содержания и ремонта в течение определенного времени.*

Пусть имеется дорожная или мостовая конструкция, представляющая собой инженерное сооружение, которое характеризуется совокупностью параметров R_n , $n = 1, \dots, k$, где k - количество параметров. Каждый из этих параметров имеет требуемое номинальное значение R_n^0 . Изменение этих параметров во времени характеризует состояние дорожной или мостовой конструкции. В период работы автомобильной дороги происходит снижение значений параметров дорожных или мостовых конструкций в результате физического износа конструктивных элементов. То есть, в определенный момент времени t_i , $i = 1, \dots, m$, значения параметров конструкций не увеличиваются, а остаются на прежнем уровне или уменьшаются $R_n(t_1) > R_n(t_2), \dots, > R_n(t_m)$, при условии, что $t_1 < t_2, \dots, < t_m$. Конструкция является работоспособной если значения параметров, обеспечивающих ее работоспособность принадлежат области допустимых значений Q_n , границы которой определяется минимальным $R_{n,\min}$ и максимальным $R_{n,\max}$ значениями $Q_n = R_{n,\min} < R_n^0 < R_{n,\max}$. Допускается, что выход значения параметра за пределы допустимой области приводит к параметрическому отказу конструкции. Однако параметрический отказ не влечет за собой утрату функций всей дорожной или мостовой конструкции. В действительности такой отказ лишь снижает ее работоспособность. Вероятность внезапного отказа в работе сразу всей конструкции достаточно мала. Вместе с тем дорожным и мостовым конструкциям свойственны параметрические отказы. Их последствия устраняются в процессе содержания и ремонтов дорожных сооружений. Исходя из этого автомобильная дорога и дорожные сооружения относятся к восстанавливаемым техническим системам с множеством возможных состояний $S_n(t) = \{s_0(t), s_1(t), \dots, s_{m-1}(t), s_m(t)\}$.

Дорожная конструкция может находиться в состоянии $s_0(t)$, при котором ни один из параметров не вышел за границы (не отказал) области допустимых значений; $s_1(t)$ - вышел за границы (отказал) один параметр; $s_m(t)$ - вышли за границы (отказали) все параметры. Поскольку дорожная или мостовая конструкция имеют определенный характер износа или последовательность деградации предполагается, что процесс смены ее состояний происходит упорядоченно: $s_0(t), s_1(t), s_2(t), \dots, s_m(t)$. Соответственно переход конструкции из одного в другое состояние

является случайным событием. Известна или может быть спрогнозирована интенсивность λ_n выхода за границы допустимой области изменения параметра R_n . Предполагается, что эта интенсивность одинакова для всех параметров, характеризующих работоспособность конструкции. Такие же допущения приняты в отношении интенсивности восстановления параметров μ_n . Допускается, что поток отказов параметров является простейшим, а функции плотности отказа и восстановления параметров являются показательными с параметрами λ и μ .

Суммарные затраты ресурсов на поддержание дорожной или мостовой конструкции в момент времени t в состоянии $S_n(t)$ будут равны $Z_n(t)$, $n = 0, \dots, m$. Известен средний расход ресурсов (норматив) на восстановление каждого параметра $\Delta Z_{n, \text{восст}}$ и на поддержание в период эксплуатации $\Delta Z_{\text{экспл}}$.

Требуется определить долговечность дорожной или мостовой конструкции с учетом ограничений на выделяемые ресурсы на поддержание их в работоспособном состоянии.

Решение сформулированной задачи предусматривает выполнение следующих действий.

1. Расчет расхода материальных ресурсов на поддержание конструкции в любом возможном состоянии $s_n(t)$, $n = 0, \dots, m$.

Для этого вначале рассматривается состояние конструкции $s_0(t)$, при котором она в момент времени $t + \Delta t$, при котором она будет работать безотказно по всем определяющим параметрам. В соответствии с основными теоремами теории вероятностей такое состояние конструкции характеризуется суммой двух несовместных событий θ_0 и θ_1 .

Событие θ_0 соответствует состоянию конструкции $s_0(t)$, при котором за время Δt все ее параметры находились в области допустимых значений. Вероятность такого события может быть рассчитана по формуле:

$$P(\theta_0) = e^{-\lambda \Delta t} \approx 1 - \lambda \Delta t.$$

Тогда расход ресурсов для этого состояния конструкции с вероятностью $P(\theta_0)$ можно определить по зависимости:

$$Z(\theta_0) = (Z_0(t) + \Delta Z_{\text{экспл}} \Delta t)(1 - \lambda \Delta t) \quad (1)$$

В свою очередь событие θ_1 соответствует состоянию конструкции $s_1(t)$, при котором за время Δt было восстановлено значение одного нарушенного параметра. Такое состояние конструкции может быть определено вероятностью $P(\theta_1) = 1 - e^{-\mu \Delta t} \approx \mu \Delta t$. В этом случае расход ресурсов с вероятностью $P(\theta_1)$ составит:

$$Z(\theta_1) = Z_1(t) \mu \Delta t \quad (2)$$

Исходя из приведенных суждений, состояние конструкции $s_0(t)$ предполагается интерпретировать как сумму несовместных событий θ_0 и θ_1 . Тогда уравнение для случайной функции расхода материальных средств будет иметь следующий вид

$$Z_0(t + \Delta t) = Z(\theta_0) + Z(\theta_1) = (Z_0(t) + \Delta Z_{\text{экспл.}} \Delta t)(1 - \lambda \Delta t) + Z_1(t) \mu \Delta t \quad (3)$$

Это уравнение можно преобразовать к следующему виду

$$Z_0(t + \Delta t) - Z_0(t) = -\lambda \Delta t Z_0(t) + \mu \Delta t Z_1(t) + \Delta Z_{\text{экспл.}} \Delta t - \lambda \Delta t^2 \Delta Z_{\text{экспл.}} \quad (4)$$

В результате деления всех частей этого равенства на Δt и определения предела получившегося выражения при $\Delta t \rightarrow 0$ получается дифференциальное уравнение

$$\frac{dZ_0(t)}{dt} = -\lambda Z_0(t) + \mu Z_1(t) + \Delta Z_{\text{экспл.}} \quad (5)$$

Далее составляются аналогичные уравнения расхода материальных ресурсов на поддержание конструкции в состоянии $s_n(t)$, $n = \overline{0, \dots, m}$. Следует заметить, что состояние конструкции $s_n(t)$ состоит в отказе n параметров к текущему моменту времени ее работы $t + \Delta t$. Подобное состояние в терминах теории вероятностей можно описать как сумму трех несовместных событий θ_n , θ_{n+1} , θ_{n-1} .

Событие θ_n соответствует такому состоянию конструкции $s_n(t)$, при котором за время Δt не отказал и не восстановился ни один параметр. Чтобы определить вероятность такого события можно воспользоваться следующей зависимостью

$$P(\theta_n) = e^{-\lambda \Delta t} e^{-\mu \Delta t} \approx 1 - (\lambda + \mu) \Delta t \quad (6)$$

Для поддержания конструкции в таком состоянии расход материальных ресурсов с вероятностью $P(\theta_n)$ может быть рассчитан по формуле

$$Z(\theta_n) = (Z_n(t) + \Delta Z_{\text{экспл.}} \Delta t)(1 - (\lambda + \mu) \Delta t) \quad (7)$$

Событие θ_{n+1} характеризует состояние конструкции $s_{n+1}(t)$ в момент времени t , при котором за время Δt был восстановлен один ее параметр. Определение вероятности этого события осуществляется по формуле

$$P(\theta_{n+1}) = 1 - e^{-\mu \Delta t} \approx \mu \Delta t, \quad (8)$$

а расход материальных ресурсов с вероятностью $P(\theta_{n+1})$ по формуле

$$Z(\theta_{n+1}) = Z_{n+1}(t) \mu \Delta t \quad (9)$$

Событие θ_{n-1} определяется тем, что в момент времени t за время Δt отказал еще один параметр конструкции. Для расчета вероятности этого события воспользуемся выражением

$$P(\theta_{n-1}) = 1 - e^{-\lambda \Delta t} \approx \lambda \Delta t \quad (10)$$

При этом расход материальных ресурсов с вероятностью $P(\theta_{n-1})$ можно определить из выражения

$$Z(\theta_{n-1}) = Z_{n-1}(t) \lambda \Delta t \quad (11)$$

Расход материальных ресурсов на поддержание конструкции в состоянии $s_n(t)$, которое характеризуется суммой рассмотренных несовместных событий θ_n , θ_{n+1} , θ_{n-1} определяется из уравнения для случайной функции

$$\begin{aligned} Z_n(t + \Delta t) &= Z(\theta_n) + Z(\theta_{n+1}) + Z(\theta_{n-1}) = \\ &= (Z_n(t) + \Delta Z_{\text{экспл.}} \Delta t)(1 - (\lambda + \mu) \Delta t) + Z_{n+1}(t) \mu \Delta t + Z_{n-1}(t) \lambda \Delta t \end{aligned} \quad (12)$$

После деления всех частей этого равенства на Δt и определения предела получившегося выражения при $\Delta t \rightarrow 0$ получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dZ_n(t)}{dt} = \lambda Z_{n-1}(t) - (\lambda + \mu) Z_n(t) + \mu Z_{n+1}(t) + \Delta Z_{\text{экспл.}} + \lambda \Delta Z_{\text{восст.}} \quad (13)$$

На следующем этапе составляется уравнение состояние конструкции $s_m(t)$, при котором к $t + \Delta t$ отказали все определяющие ее работоспособность параметры. Оно определяется суммой несовместных событий θ_m , θ_{m-1} .

Событие θ_m означает то, что конструкция будет в состоянии $s_m(t)$ и за время Δt не было отказа ни по одному определяющему параметру. Тогда вероятность события θ_m может быть рассчитана по формуле

$$P(\theta_m) = e^{-\mu \Delta t} \approx 1 - \mu \Delta t$$

Следовательно, расход материальных ресурсов на поддержание конструкции в этом состоянии с вероятностью $P(\theta_m)$ может быть выражен зависимостью

$$Z(\theta_m) = (Z_m(t) + \Delta Z_{\text{экспл.}} \Delta t)(1 - \mu \Delta t) \quad (14)$$

Событие θ_{m-1} соответствует состояние конструкции $s_{m-1}(t)$, при котором за время Δt за пределы области допустимых значений $Q_n = R_{n,\min} < R_n^0 < R_{n,\max}$ вышел еще один параметр. Событие θ_{m-1} произойдет с вероятностью $P(\theta_{m-1}) = 1 - e^{-\lambda \Delta t} \approx \lambda \Delta t$.

$X(p)$ - вектор, компоненты $x_n(p)$ которого являются значениями функций $Z_n(t)$, $n = 0, \dots, m$;

$B^{(z)}(p)$ - вектор правых частей системы дифференциальных уравнений (18);

$$X(p) = \begin{bmatrix} \theta_0(p) \\ \theta_1(p) \\ \theta_2(p) \\ \theta_3(p) \\ \dots \\ \theta_{m-1}(p) \\ \theta_m(p) \end{bmatrix}, B^{(z)}(p) = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta Z_{\text{эспл.}}}{p} \\ -\frac{\Delta Z_{\text{эспл.}} + \lambda \Delta Z_{\text{восст.}}}{p} \\ \dots \\ -\frac{\Delta Z_{\text{эспл.}} + \lambda \Delta Z_{\text{восст.}}}{p} \end{bmatrix}$$

p – комплексная переменная в области существования функций $Z_n(t)$.

В соответствии с [10] найдем оценку $\dot{X}(p)$ вектора $X(p)$. Для этого используем процедуру оценки матричных коэффициентов многофакторной модели регрессионного анализа.

Упрощая систему (18) за счет исключения переменной p запишем ее в виде

$$\sum_{n=1}^{m+1} A_n X_n = B^{(z)} \quad (20)$$

где A_n - блоки матрицы $A = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n \cdot \dots \cdot A_{m+1}$;

X_n - блоки транспортированной матрицы $X = X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n \cdot \dots \cdot X_{m+1}$.

Сформируем выражения для блоков матриц A и X

$$A_1 = \begin{bmatrix} -(p + \lambda) \\ \lambda \\ O_{m-1} \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} \mu \\ -(p + \lambda + \mu) \\ \lambda \\ O_{m-2} \end{bmatrix}, A_n = \begin{bmatrix} O_{n-2} \\ \mu \\ -(p + \lambda + \mu) \\ \lambda \\ O_{m-n} \end{bmatrix}, \dots,$$

$$A_{m+1} = \begin{bmatrix} O_{m-1} \\ \mu \\ -(p + \mu) \end{bmatrix}$$

где O_a - нулевой вектор размерности a .

Тогда неизвестные в системе уравнений (18) могут быть получены из рекуррентного соотношения

$$\dot{X}_n = \dot{Z}_{n-1} = M_n A_n \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^{m+1} \varphi_j B^{(z)}, \quad (21)$$

где $M_n = \left(A_n^T \prod_{j=1}^{n-1} \varphi_j A_n \right)^{-1}$, $\varphi_j = E - A_j M_j A_j^T \prod_{i=1}^{j-1} \varphi_i$.

Выполнив обратное преобразование Лапласа для оценок (21), можно найти оригинальные случайные функции расхода материальных средств $Z_n(t)$ на обеспечение пребывания дорожной или мостовой конструкции в состоянии $s_n(t)$. При этом в момент времени t может выйти за область допустимых значений n параметров конструкции ($n = 0, \dots, m$).

Средний расход материальных средств $\bar{Z}(t)$ можно определить как математическое ожидание значений случайных функций $Z_n(t)$

$$\bar{Z}(t) = \sum_{n=0}^m Z_n(t) P_n(t), \quad (22)$$

где $P_n(t)$ означает вероятность пребывания конструкции в состоянии $s_n(t)$. По формуле (22) определяется средний расход материальных средств на поддержание конструкции в любом из ее возможных состояний. В случае близости среднего расхода материальных средств $\bar{Z}(t)$ к моменту времени $t = \dot{t}$ к дополнительному объему материальных средств Z_0 , выделяемых на эксплуатацию дорожной или мостовой конструкции можно спрогнозировать остаточный ресурс (долговечность) конструкции

$$\dot{t} = \arg \min e(Z_0 - \bar{Z}(t)); t \in T,$$

где T – множество всех возможных значений для t .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим применение методики прогнозирования долговечности дорожных сооружений для оценки остаточного ресурса дорожной конструкции. По данным статистических наблюдений известно параметры отказа дорожной конструкции характеризуются интенсивностью $\lambda = 5^{-1}$, а восстановления $\mu = 14^{-1}$. Число параметров, характеризующих работу конструкции $m = 1$.

Эксплуатационные расходы на содержание конструкции составляют $\Delta Z_{\text{экспл}} = 1000$ ед. Средний расход на восстановление отказавшего параметра $\Delta Z_{n, \text{восст}} = 5000$ ед. Требуется определить остаточный ресурс конструкции если для ее содержания выделено $Z_0 = 50000$ ед.

В результате расчета значение остаточного ресурса конструкции составляет 3 года 21 день.

Таким образом, предложенная методика может применяться при планировании работ по эксплуатации автомобильных дорог.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения безопасности на автомобильных дорогах, необходимо своевременно выполнять мероприятия по поддержанию

состояния дорожной конструкции в соответствии с заданными условиями эксплуатации. Однако, в условиях ограниченного финансирования выдерживать нормативные требования к транспортно-эксплуатационному состоянию автомобильных дорог и дорожных конструкций не представляется возможным [5].

Предложенный в данной работе метод прогнозирования долговечности дорожных сооружений позволяет рассчитать долговечность дорожной или мостовой конструкции с учетом ограничений на выделяемые ресурсы на их содержание и ремонты. Таким образом, можно планировать сбалансированные по времени и выделяемым ресурсам мероприятия по содержанию и эксплуатации дорожных сооружений.

Авторы заявляют, что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Алексеев С.В., Симонов Д.Л., Катикова А.С. Воздействие природных факторов на состояние дорог в различных регионах России // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 14–30. [Alekseev SV, Simonov DL, Katikova AS. The impact of natural factors on the condition of roads in various regions of Russia. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):14-30. (Russ., Engl.)] doi: 10.17816/transsyst20228414-30
2. Тиратурян А.Н. Симакова А.А., Бодров И.В. и др. Оценка надежности дорожной одежды на стадии эксплуатации // Инженерный вестник Дона. – 2017. – Т. 47. – №. 4. – С. 196. [Tiraturyan AN, Simakova AA, Bodrov IV, et al. Evaluation of the reliability of pavement during the operation phase. *Engineering Journal of Don*. 2017;47(4):196. (Russ., Engl.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32731338>
3. Тиратурян А.Н. Новый подход к мониторингу состояния нежестких дорожных одежд // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2019. – № 2(54). – С. 121–133. [Tiraturyan AN. New approach to technical monitoring of the condition of flexible roadway pavements. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2019;2(54):121-133. (Russ., Engl.)]. doi: 10.25987/VSTU.2019.54.2.011
4. Дараган К.А., Коновалов К.В. Проблемы качества, надежности и долговечности мостов на автомобильных дорогах // Электронный сетевой политематический журнал «научные труды КубГТУ». – 2020. – №8. – С. 687–701. [Daragan KA, Konovalov KV. Problems of quality, reliability and durability of bridges on roads. *Scientific works of KubSTU*. 2020;8:687-701. (Russ., Engl.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45768957> Ссылка активна на: 01.11.2023.
5. Апестин В.К. О расхождении проектных и нормативных межремонтных сроков службы дорожных одежд // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – № 1. – С. 18–20. [Apestin VK. About divergence between design and normative interrepair periods of road pavement service. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2011;1:18-20. (Russ., Engl.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://lib.madi.ru/nitdo/index.html>

6. Белый А.А. Основные положения методики прогнозирования сроков службы эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений // Наука и бизнес: пути развития. – 2016. – № 10(64). – С. 9–20. [Bely AA. Main provisions of the forecasting method of the service life of reinforced concrete bridges. *Science and Business: Ways of Development*. 2016;10(64):9-20. (Russ., Engl.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27328105>
7. Гуга Н.А., Аверченко Г.А., Васильев К.А. и др. Планирование затрат и пути совершенствования службы эксплуатации мостов // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2021. – № 2 (7). – С. 30–41. [Guga NA, Averchenko GA, Vasiliev KA, et al. Cost planning and ways to improve bridge maintenance. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(2):30-41. (Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst20217230-41
8. Кулижников А.М. Пути увеличения межремонтных сроков службы автомобильных дорог // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2018. – № 2 (75). – С. 46–50. [Kulizhnikov AM. Methods for increasing the motorway repair-to-repair time. *Transport Rossiiskoi Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike*. 2018;2(75):46-50. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/puti-uvelicheniya-mezhremontnyh-srokov-sluzhby-avtomobilnyh-dorog>
9. Муравьева Н.А. Анализ состояния вопросов обеспечения безопасности движения с учетом дорожных условий // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2017. – № 1(21). – С. 62–67. [Muravyova NA. The analysis of the condition of questions of safety of the movement taking into account road conditions. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*. 2017;1(21):62-67 (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30522609>
10. Ермошин Н.А. Моделирование и оценка риска разрушения дорожной одежды на автомобильных дорогах / Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 11–13 ноября 2019 года; Воронеж: Воронежский государственный университет, Научно-исследовательские публикации, 2020. – С. 1365–1371. [Ermoshin NA. Modelirovanie i ocenka riska razrusheniya dorozhnoj odezhdy` na avtomobil`ny`x dorogax In: Proceedings of the International Scientific Conference “Aktual'nye problemy prikladnoi matematiki, informatiki i mekhaniki”. 2019 November 11-13; Voronezh. Nauchno-issledovatel'skie publikacii; 2020. pp. 1365-1371. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42493583>
11. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г. и др. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1 // Транспортные сооружения. – 2017. – Т. 4. – № 4. – С. 11. [Maystrenko IY, Ovchinnikov II, Ovchinnikov IG, et al. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 1. *Russian journal of transport engineering*. 2017;4(4):11. (Russ., Engl.)]. doi: 10.15862/13TS417
12. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Майстренко И.Ю. и др. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 2 // Транспортные сооружения. – 2017. – Т. 4. – № 4. – С. 12. [Ovchinnikov IG, Ovchinnikov II, Maystrenko IY, et al. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 2. *Russian journal of transport engineering*. 2017;4(4):11. (Russ., Engl.)]. doi: 10.15862/14TS417
13. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г. и др. Аварии и

- разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 3 // Транспортные сооружения. – 2018. – Т. 5. – № 1. – С. 8. [Maystrenko IY, Ovchinnikov II, Ovchinnikov IG, et al. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 3. *Russian journal of transport engineering*. 2018;5(1):8. (Russ., Engl.)]. doi: 10.15862/08SATS118
14. Овчинников И.И., Майстренко И.Ю., Овчинников И.Г. и др. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 4 // Транспортные сооружения. – 2018. – Т. 5. – № 1. – С. 5. [Ovchinnikov II, Maystrenko IY, Ovchinnikov IG, et al. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 4. *Russian journal of transport engineering*. 2018;5(1):5. (Russ., Engl.)]. doi: 10.15862/05SATS118
15. Баканов К.С., Ляхов П.В., Наумов С.Б. и др. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 2020 год. Информационно-аналитический обзор / под ред. Д.В. Митрошина, С.А. Рыжова. – М.: ФКУ «НЦ БДД МВД России», 2021. – 79 с. [Bakanov KS, Lyahov PV, Naumov SB, et al. *Dorozhno-transportnaya avariinost' v Rossiiskoi Federatsii za 2020 god. Informatsionno-analiticheskii obzor*. Mitroshin DV, Ryzhov SA, editors. Moscow: Scientific State Institution of Road Safety of the Ministry of the Interior of the Russian Federation; 2021, 79 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://media.mvd.ru/files/embed/2174641>
16. Баканов К.С., Ляхов П.В., Лопарев Е.А. и др. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 2021 год. Информационно-аналитический обзор / под ред. Д.В. Митрошина, С.А. Рыжова. – М.: НЦ БДД МВД России, 2022. – 126 с. [Bakanov KS, Lyahov PV, Loparev EA, et al. *Dorozhno-transportnaya avariinost' v Rossiiskoi Federatsii za 2021 god. Informatsionno-analiticheskii obzor* Mitroshin DV, Ryzhov SA, editors. Moscow: Scientific State Institution of Road Safety of the Ministry of the Interior of the Russian Federation; 2022, 126 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://media.mvd.ru/files/embed/3935922>
17. Баканов К.С., Ляхов П.В., Айсанов А.С. и др. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 2022 год. Информационно-аналитический обзор / под ред. Д.В. Митрошина, С.А. Рыжова. – М.: НЦ БДД МВД России, 2023. – 150 с. [Bakanov KS, Lyahov PV, Ajsanov AS, et al. *Dorozhno-transportnaya avariinost' v Rossiiskoi Federatsii za 2022 god. Informatsionno-analiticheskii obzor* Mitroshin DV, Ryzhov SA, editors. Moscow: Scientific State Institution of Road Safety of the Ministry of the Interior of the Russian Federation; 2023, 150 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://media.mvd.ru/files/embed/4761994>
18. Казарновский В.Д. Расчетный срок службы и уровень надежности при расчете дорожных одежд на прочность // Транспортное строительство. – 2007. – № 1. – С. 72–73. [Kazarnovskij VD. *Raschetnyi srok sluzhby i uroven' nadezhnosti pri raschete dorozhnykh odezhd na prochnost'*. *Transport construction*. 2007;1:72-73. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://rostransport.com/transportrf/pdf/7-8/72-73.pdf>
19. Углова Е.В. Прогнозирование остаточного ресурса асфальтобетонных покрытий с учетом реальных условий эксплуатации // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2010. – № 17 (36). – С. 43–47. [Uglova EV. *Forecasting of the residual resource asphalt concrete coverings with the account real working conditions*. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series "Construction and Architecture"*. 2010;17(36):43-47. (Russ., Engl.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по:

<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13088680>

20. Васильев А.И. Деградационные процессы и остаточный ресурс долговечности мостовых элементов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2020. – № 1(23). – С. 1. [Vasilyev AI. Degradation processes and residual resource durability of bridge elements. Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. 2020;1(23):1. (Russ., Engl.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43083465>
21. Васильев А. И., Валиев Ш. Н., Шмидт В. С. и др. Длительные деградационные процессы, влияющие на снижение грузоподъемности и долговечности мостовых сооружений в период их эксплуатации // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14 – № 2. – С. 50. [Vasilyev AI, Valiev SHN, Schmidt VS, et al. Long-term degradation processes affecting the reduction of load capacity and durability of bridge structures during their maintenance. The Eurasian Scientific Journal. 2022;14(2):50. (Russ., Engl.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49089496>

Сведения об авторах:

Ермошин Николай Алексеевич, доктор военных наук, профессор;

eLibrary SPIN: 6694-8297; ORCID: 0000-0002-0367-5375;

E-mail: ermonata@mail.ru

Кириллова Диана Юрьевна, ассистент, Инженерно-строительный институт;

eLibrary SPIN: 2517-3033; ORCID: 0000-0003-3440-2182;

E-mail: kirdiana@mail.ru

Information about the authors:

Nikolay A. Ermoshin, Doctor of Military Sciences, Professor;

eLibrary SPIN: 6694-8297; ORCID: 0000-0002-0367-5375;

E-mail: ermonata@mail.ru

Diana Yu. Kirillova, Assistant, Civil Engineering Institute;

eLibrary SPIN: 2517-3033; ORCID: 0000-0003-3440-2182;

E-mail: kirdiana@mail.ru

Цитировать:

Ермошин Н.А., Кириллова Д.Ю. Метод прогнозирования долговечности дорожных сооружений // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 46–58. doi: 10.17816/transsyst20239446-58

To cite this article:

Ermoshin NA, Kirillova DYU. Method of forecasting the durability of road structures. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(4):46-58. doi: 10.17816/transsyst20239446-58

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехнические комплексы и системы

УДК [UDC] 621.314

DOI 10.17816/transsyst20239459-71

© В.В. Никитин, Т. Чжао

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

ЛИНЕЙНЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ БОРТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ ЭКИПАЖЕЙ

Обоснование: Транспорт на магнитном подвесе является перспективным видом транспорта, который способен обеспечить пассажирские и грузовые перевозки со скоростями до 400-500 км/ч, а в более отдаленной перспективе – до 1000 км/ч. Активные исследования в этой области ведутся в Китае, Японии, США. В настоящее время в Китае и Японии для коммерческих перевозок достигнуты скорости движения 450-500 км/ч, приняты перспективные программы строительства высокоскоростных магнитолевитационных трасс и создания подвижного состава. При таких скоростях движения одной из актуальных проблем является проблема бесконтактной передачи энергии для бортовых потребителей, расположенных на экипаже, потому что обеспечить надежный контактный токосъем при скоростях 450-500 км/ч и выше весьма затруднительно.

Цель: разработка конструкции, расчет и анализ характеристик линейного генератора электрической энергии для бесконтактной передачи мощности на движущийся экипаж высокоскоростного транспорта на магнитном подвесе.

Материалы и методы: для расчета внешнего магнитного поля индуктора линейного генератора и ЭДС, наводимой в приемной катушке экипажа, использованы методы теории электромагнитного поля и теории электрических цепей; расчетные алгоритмы реализованы в программной среде Visual Basic for Applications.

Результаты: предложена конструкция и выполнен расчет внешнего магнитного поля индуктора с транспозицией проводников; для увеличения ЭДС, индуцируемой в приемной катушке экипажа, предложено придать приемной катушке двойную 8-образную форму; установлено наиболее рациональное межконтурное расстояние индуктора линейного генератора; определен характер изменения магнитного потока, пронизывающего приемную катушку при движении экипажа, и величина ЭДС, наводимой в приемной катушке.

Заключение: результаты могут быть использованы при разработке подвижного состава для перспективных систем высокоскоростного транспорта на магнитном подвесе.

Ключевые слова: высокоскоростной наземный транспорт, магнитный подвес, бесконтактная передача энергии.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrotechnical complexes and systems

© **Victor V. Nikitin, Zhao Tianzhong**Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St.-Petersburg, Russia)**LINEAR GENERATOR FOR POWER SUPPLY TO ON-BOARD
CONSUMERS OF HIGH-SPEED MAGNETICALLY LEVITATED
CARRIAGES**

Background: Maglev transport is a promising mode of transport that can provide passenger and freight transportation at speeds of up to 400-500 km/h, and in the longer term – up to 1000 km/h. Active research in this area is being conducted in China, Japan, and the USA. Currently, in China and Japan, speeds of 450-500 km/h have been achieved for commercial transportation, and promising programs have been adopted for the construction of high-speed maglev tracks and the creation of rolling stock. At such speeds, one of the pressing problems is the problem of contactless energy transfer for on-board consumers located on the carriage, because it is very difficult to ensure reliable contact current collection at speeds of 450-500 km/h and above.

Aim: development of the design, calculation and analysis of the characteristics of a linear generator of electrical energy for contactless power transfer to the moving crew of high-speed magnetically levitated transport.

Materials and methods: to calculate the external magnetic field of the linear generator inductor and the EMF induced in the receiving coil of the crew, methods of electromagnetic field theory and electrical circuit theory were used; calculation algorithms are implemented in the Visual Basic for Applications software environment.

Results: a design was proposed and the calculation of the external magnetic field of an inductor with transposition of conductors was performed; to increase the EMF induced in the receiving coil of the crew, it is proposed to give the receiving coil a double 8-shape; the most rational inter-circuit distance of the linear generator inductor has been established; the nature of the change in the magnetic flux penetrating the receiving coil when the vehicle moves, and the magnitude of the emf induced in the receiving coil are determined.

Conclusion: the results can be used in the development of rolling stock for promising high-speed maglev transport systems.

Key words: high-speed ground transport, magnetic suspension, contactless energy transfer.

ВВЕДЕНИЕ

Высокоскоростные магнитолевитационные экипажи должны нести на борту ряд потребителей электрической энергии, которые обеспечивают собственные нужды экипажа. Основными из них являются: системы криогенного обеспечения сверхпроводящих магнитов тяги, подвеса и направления экипажей с электродинамическим подвесом; вспомогательные системы выпуска и подъема разгонно-посадочных колесных шасси экипажей с электродинамическим подвесом; системы питания электромагнитов подвеса, тяги и направления экипажей с

электромагнитным подвесом; системы автоматического управления и радиосвязи; системы освещения пассажирских салонов; системы кондиционирования воздуха пассажирских салонов; системы информационного обеспечения пассажирских салонов [1–5].

Учитывая имеющийся опыт разработки и создания высокоскоростных магнитолевитационных экипажей, а также богатый опыт разработки современного моторвагонного подвижного состава для железных дорог, можно оценить величину суммарной мощности бортовых потребителей на уровне 100-120 кВт на вагон (экипаж) [6–9].

Можно выделить два основных практически реализуемых способа бесконтактной передачи энергии для потребителей собственных нужд высокоскоростных магнитолевитационных экипажей:

1. Бесконтактная система передачи энергии на движущийся экипаж на основе электромагнитной индукции. Такие системы способны передавать энергию на экипаж как на стоянке (линейные трансформаторы), так и при движении экипажа (линейные генераторы) от наземных стационарных систем тягового электроснабжения;

2. Бортовые системы производства и хранения энергии (аккумуляторные батареи, электрохимические генераторы на основе водородных топливных элементов). Такие системы после пополнения от стационарных источников способны обеспечивать бортовые потребители независимо от устройств внешнего электроснабжения (автономные системы энергообеспечения).

Поскольку бортовые потребители энергии различного назначения характеризуются весьма разнообразными требованиями к мощности, напряжению, стабильности и качеству электропитания, необходимым элементом в системе энергообеспечения должны быть полупроводниковые преобразователи электрической энергии, получаемой от источников (линейных генераторов, трансформаторов или систем производства и хранения энергии).

В настоящей статье рассматривается вариант конструкции, основные расчетные соотношения и характеристики бесконтактного линейного генератора электрической энергии (ЛГЭЭ), принцип действия которого основан на явлении электромагнитной индукции ЭДС и тока в приемной катушке, размещенной на движущемся экипаже, при ее перемещении относительно переменного-полюсной магнитной системы неподвижного индуктора, размещенного на путевом полотне (эстакаде).

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЛИНЕЙНОГО ГЕНЕРАТОРА С ТРАНСПОЗИЦИЕЙ ТОКОПРОВОДОВ ИНДУКТОРА

Принципиальная схема ЛГЭЭ с транспозицией проводников индуктора представлена на Рис. 1. На боковой (вертикальной) поверхности

путевой эстакады размещены проводники индуктора, питаемые постоянным током от источника тока. Для уменьшения потерь энергии питание проводников индуктора должно осуществляться посекционно, по мере движения высокоскоростного экипажа. Транспозиция проводников индуктора обеспечивает изменение направления намагничивающей силы на каждом полюсном делении, благодаря чему создается переменноплюсная магнитная система индуктора. Приемная катушка экипажа движется со скоростью V вдоль оси X на расстоянии δ , которое представляет собой воздушный зазор между первичной (индуктор) и вторичной (приемная катушка) частями ЛГЭЭ.

Рассматриваемая система взаимодействующих контуров индуктора с током I и приемной катушки экипажа (ПК) расположена в однородной среде с магнитной проницаемостью $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Магнитная индукция поля индуктора в зоне движения ПК характеризуется тремя пространственными компонентами:

$$\vec{B} = \vec{e}_X B_X + \vec{e}_Y B_Y + \vec{e}_Z B_Z,$$

где $\vec{e}_X; \vec{e}_Y; \vec{e}_Z$ – единичные векторы по координатным осям X, Y, Z ;

B_X, B_Y, B_Z – компоненты магнитной индукции по осям X, Y, Z .

Для определения ЭДС, наводимой в ПК экипажа, необходимо знать распределение компоненты магнитного поля индуктора $B_Y(x, z)$, нормальной к поверхности ПК. Для ее расчета примем упрощающее допущение: шестиугольный контур индуктора заменим прямоугольным контуром с такой же намагничивающей силой. Принятое допущение позволяет воспользоваться следующим выражением для расчета Y -компоненты магнитного поля индуктора, в точке наблюдения $Q(x, y, z)$ [10, 11]:

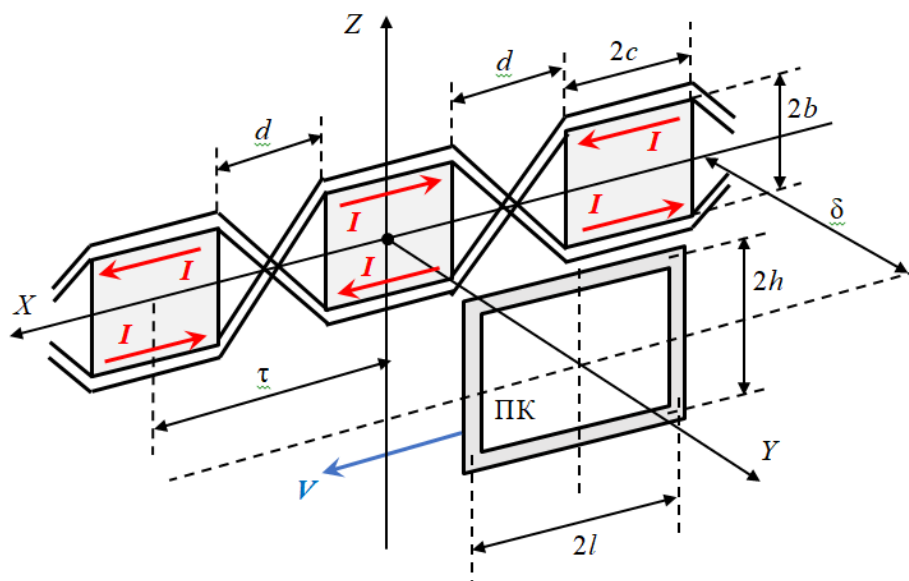


Рис. 1. Линейный генератор с транспозицией проводников индуктора

$$B_y(x, y, z) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} (A - B + C - D), \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} A &= \frac{x - c}{(x - c)^2 + y^2} \left(\frac{z + b}{r_2} - \frac{z - b}{r_1} \right), \\ B &= \frac{x + c}{(x + c)^2 + y^2} \left(\frac{z + b}{r_4} - \frac{z - b}{r_3} \right), \\ C &= \frac{z - b}{(z - b)^2 + y^2} \left(\frac{x + c}{r_3} - \frac{x - c}{r_1} \right), \\ D &= \frac{z + b}{(z + b)^2 + y^2} \left(\frac{x + c}{r_4} - \frac{x - c}{r_2} \right), \\ r_1 &= [(x - c)^2 + y^2 + (z - b)^2]^{1/2}, \\ r_2 &= [(x - c)^2 + y^2 + (z + b)^2]^{1/2}, \\ r_3 &= [(x + c)^2 + y^2 + (z - b)^2]^{1/2}, \\ r_4 &= [(x + c)^2 + y^2 + (z + b)^2]^{1/2}. \end{aligned}$$

Для удобства расчетов все геометрические размеры магнитной системы целесообразно выразить в относительных единицах, приняв за базис размер c катушки индуктора. Относительные размеры будем обозначать чертой сверху:

$$\begin{aligned} \bar{c} &= 1, \quad \bar{b} = b/c, \quad \bar{h} = h/c, \quad \bar{l} = l/c, \\ \bar{\delta} &= \delta/c, \quad \bar{d} = d/c, \quad \bar{\tau} = \tau/c, \quad \bar{\tau} = 2 + \bar{d}. \end{aligned}$$

В дальнейшем будем рассматривать Y -компоненту магнитной индукции в расчете на единицу намагничивающей силы контура индуктора, тогда выражение (1) примет вид:

$$\bar{B}_y(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = \frac{\mu_0}{4\pi} (\bar{A} - \bar{B} + \bar{C} - \bar{D}), \quad [\text{Тл/А}], \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \frac{\bar{x} - 1}{(\bar{x} - 1)^2 + \bar{y}^2} \left(\frac{\bar{z} + \bar{b}}{\bar{r}_2} - \frac{\bar{z} - \bar{b}}{\bar{r}_1} \right), \\ \bar{B} &= \frac{\bar{x} + 1}{(\bar{x} + 1)^2 + \bar{y}^2} \left(\frac{\bar{z} + \bar{b}}{\bar{r}_4} - \frac{\bar{z} - \bar{b}}{\bar{r}_3} \right), \\ \bar{C} &= \frac{\bar{z} - \bar{b}}{(\bar{z} - \bar{b})^2 + \bar{y}^2} \left(\frac{\bar{x} + 1}{\bar{r}_3} - \frac{\bar{x} - 1}{\bar{r}_1} \right), \\ \bar{D} &= \frac{\bar{z} + \bar{b}}{(\bar{z} + \bar{b})^2 + \bar{y}^2} \left(\frac{\bar{x} + 1}{\bar{r}_4} - \frac{\bar{x} - 1}{\bar{r}_2} \right), \\ \bar{r}_1 &= [(\bar{x} - 1)^2 + \bar{y}^2 + (\bar{z} - \bar{b})^2]^{1/2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{r}_2 &= \left[(\bar{x} - 1)^2 + \bar{y}^2 + (\bar{z} + \bar{b})^2 \right]^{1/2}, \\ \bar{r}_3 &= \left[(\bar{x} + 1)^2 + \bar{y}^2 + (\bar{z} - \bar{b})^2 \right]^{1/2}, \\ \bar{r}_4 &= \left[(\bar{x} + 1)^2 + \bar{y}^2 + (\bar{z} + \bar{b})^2 \right]^{1/2}.\end{aligned}$$

Характер изменения Y -компоненты магнитного поля уединенного контура индуктора в зоне размещения ПК экипажа при $z=0$ и $b=0,5$ (по продольной оси симметрии контура индуктора) в зависимости от воздушного зазора δ представлен на Рис. 2. Из графиков следует, что, например, для контура индуктора с размерами $c=1,0$ м и $b=0,5$ м при намагничивающей силе $F=wI=1000$ А в точке с координатами $x=0$, $y=0,2$ м, $z=0$ (точка, соответствующая геометрическому центру контура индуктора) магнитная индукция составит $B_y=0,777$ мТл.

Характер распределения нормальной к поверхности ПК компоненты магнитного поля индуктора по координате Z аналогичен ее распределению по координате X . С целью увеличения магнитного потока, пронизывающего контур ПК экипажа, и ЭДС, наводимой в ней, целесообразно использовать Y -компоненту магнитного поля за пределами проекции контура индуктора на плоскость ПК, т.е. поле в областях $|Z| > b$. Для этого ПК экипажа можно придать двойную 8-образную форму, изображенную на Рис. 3.

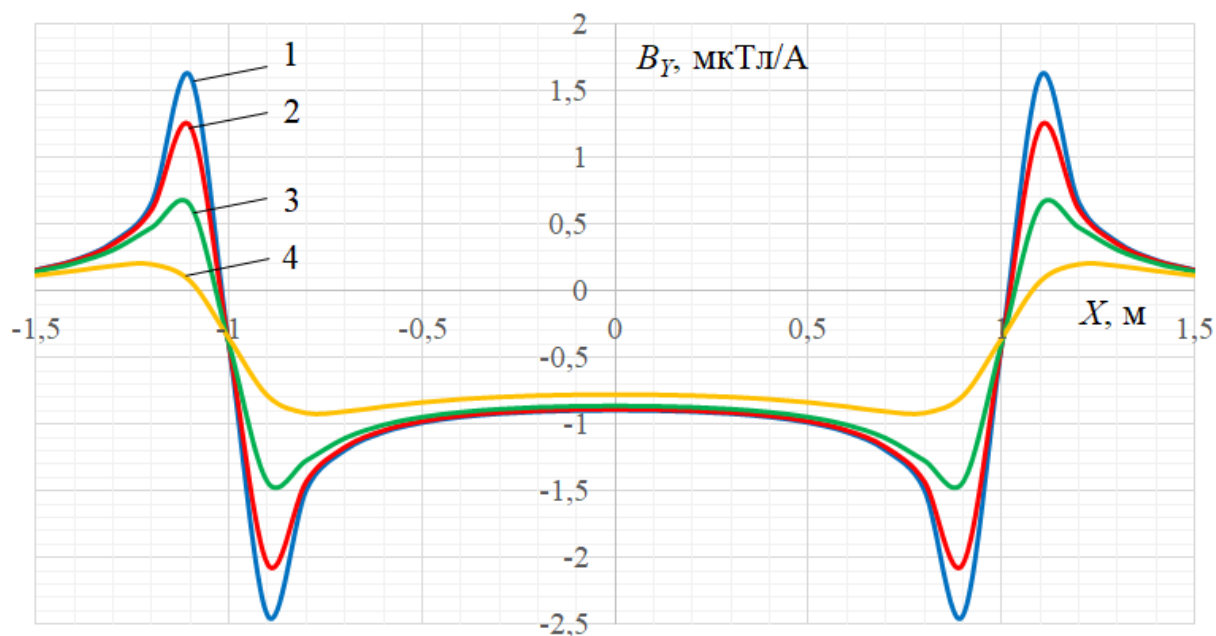


Рис. 2. Распределение Y -компоненты магнитной индукции по координате X для уединенного токового контура при $Z=0$ и различных значениях воздушного зазора.
1 – $\delta=0,01$; 2 – $\delta=0,05$; 3 – $\delta=0,1$; 4 – $\delta=0,2$

Индуктор ЛГЭЭ представляет собой переменного-полюсную систему, образованную последовательностью токовых контуров, расположенных вдоль путевого полотна (эстакады). По этой причине необходимо учесть влияние соседних контуров индуктора на распределение Y -компоненты магнитного поля на полюсном делении. Поскольку рассматриваемая магнитная система характеризуется линейными свойствами, результирующее магнитное поле можно определить по принципу наложения полей соседних контуров, рассчитываемых с помощью выражения (2). Расчеты показывают, что для определения результирующего поля в продольных границах данного токового контура достаточно учитывать поля двух соседних с ним контуров, расположенных слева и справа.

Характер распределения Y -компоненты магнитного поля индуктора вдоль оси X на двойном полюсном делении при $Z=0$, $\delta=0,1$ и различных значениях межконтурного промежутка d дан на Рис. 4.

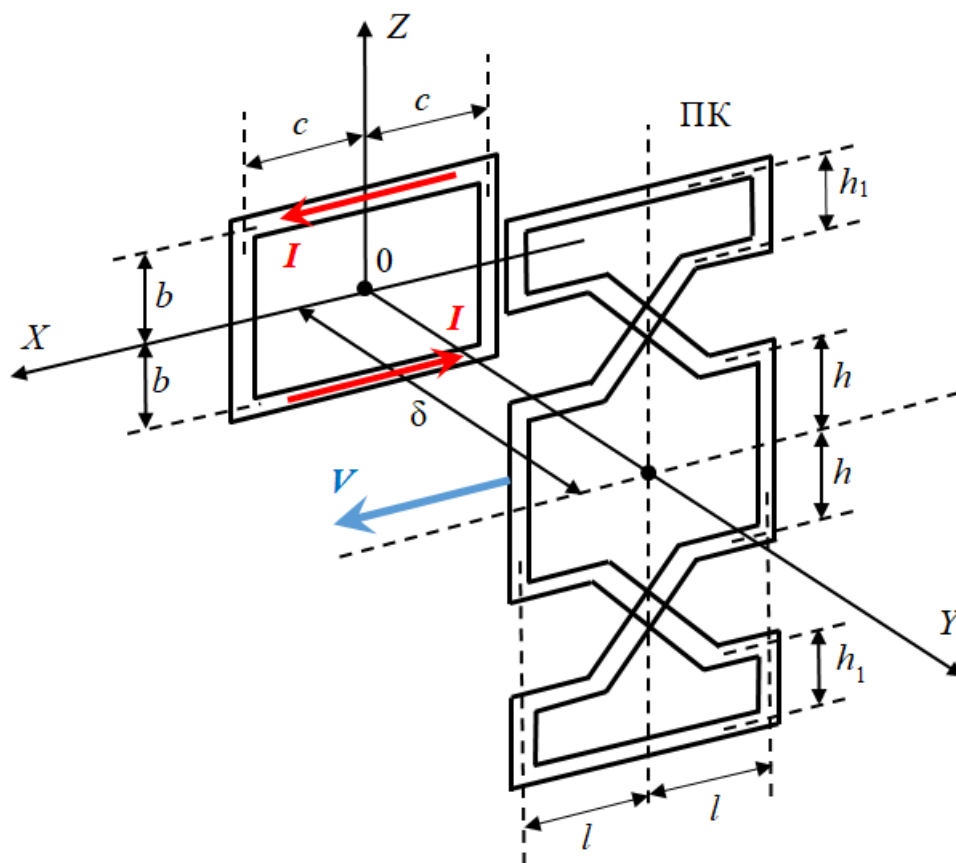


Рис. 3. Приемная катушка двойной 8-образной формы

Как видно, влияние соседних токовых контуров на распределение Y -компоненты магнитного поля данного контура проявляется в некотором увеличении индукции за счет токов, протекающих по вертикальным ребрам соседних контуров сонаправленно с токами данного контура. При

$d=0,1$ это влияние более выражено, чем при $d=0,5$. При $d=0,1$ распределение Y -компоненты магнитного поля индуктора более равномерное, чем при $d=0,5$. Следовательно, спектр пространственных гармоник магнитного поля индуктора в первом случае (при $d=0,1$) будет содержать меньше составляющих. Выбор размера $d=0,1$ представляется более целесообразным еще и по той причине, что уменьшение размера d даст возможность уменьшить полюсное деление τ индуктора, что при заданной скорости движения экипажа позволит получить большую частоту и амплитуду ЭДС, индуктированной в ПК экипажа.

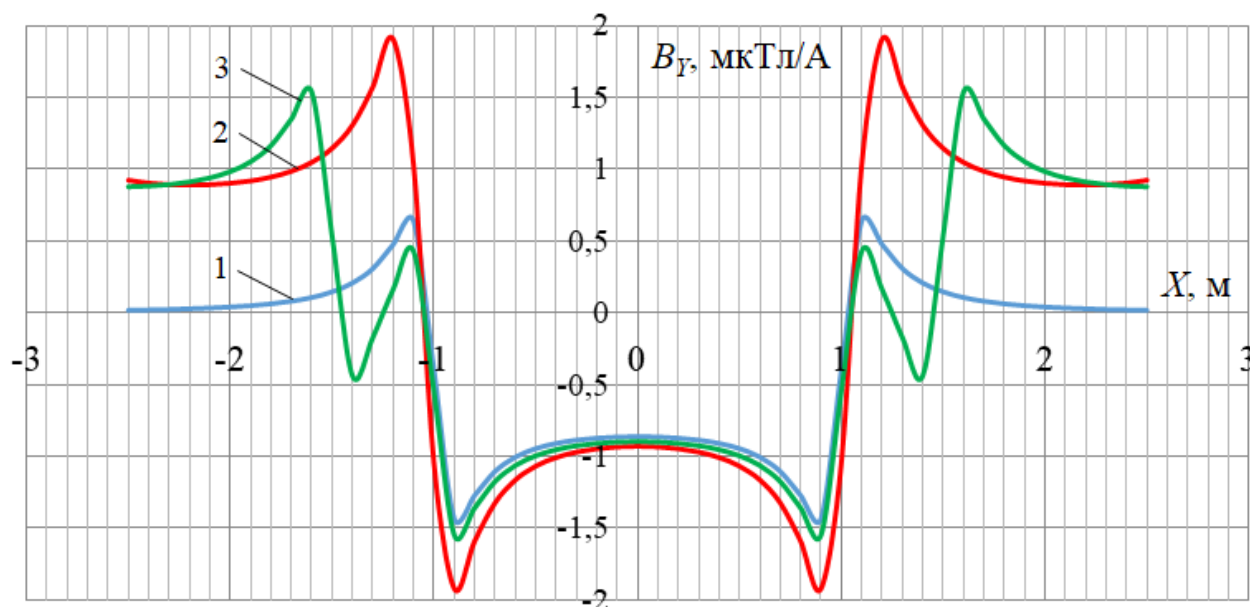


Рис. 4. Распределение Y -компоненты магнитного поля индуктора вдоль оси X на двойном полюсном делении при $Z=0$, $\delta=0,1$ и различных значениях межконтурного промежутка d .
1 – уединенный контур; 2 – система контуров при $d=0,1$;
3 – система контуров при $d=0,5$

МАГНИТНЫЙ ПОТОК И ЭДС ПРИЕМНОЙ КАТУШКИ ЛИНЕЙНОГО ГЕНЕРАТОРА С ТРАНСПОЗИЦИЕЙ ТОКОПРОВОДОВ ИНДУКТОРА

Магнитный поток (в расчете на единицу намагничивающей силы контура индуктора), пронизывающий контур ПК, можно найти, проинтегрировав Y -компоненту магнитного поля индуктора площади поверхности ПК экипажа:

$$\overline{\Phi} = \int_{-h}^h \int_{-l}^l \overline{B}_y(\overline{x}, \overline{z}) dx dz + 2 \int_{-h_1}^{h_1} \int_{-l}^l \overline{B}_y(\overline{x}, \overline{z}) dx dz, \quad (3)$$

В выражении (3) первое слагаемое соответствует магнитному потоку, который пронизывает основную часть контура ПК размером $2l \times 2h$, а второе слагаемое – магнитному потоку, пронизывающему "добавочные" контуры ПК размером $2l \times 2h_1$, если ПК экипажа имеет двойную 8-образную форму.

На Рис. 5 приведены кривые изменения результирующего магнитного потока $\bar{\Phi}$, определенного по выражению (3), в зависимости от относительного смещения $\bar{a} = a/c$ для ПК, имеющих прямоугольную и двойную 8-образную форму при следующих геометрических размерах:

$$\bar{h} = \bar{b} = 0,5; \bar{d} = 0,1; \bar{\delta} = 0,05; \bar{l} = 1; \bar{h}_1 = \bar{b} = 0,5; \bar{g} = 0,1.$$

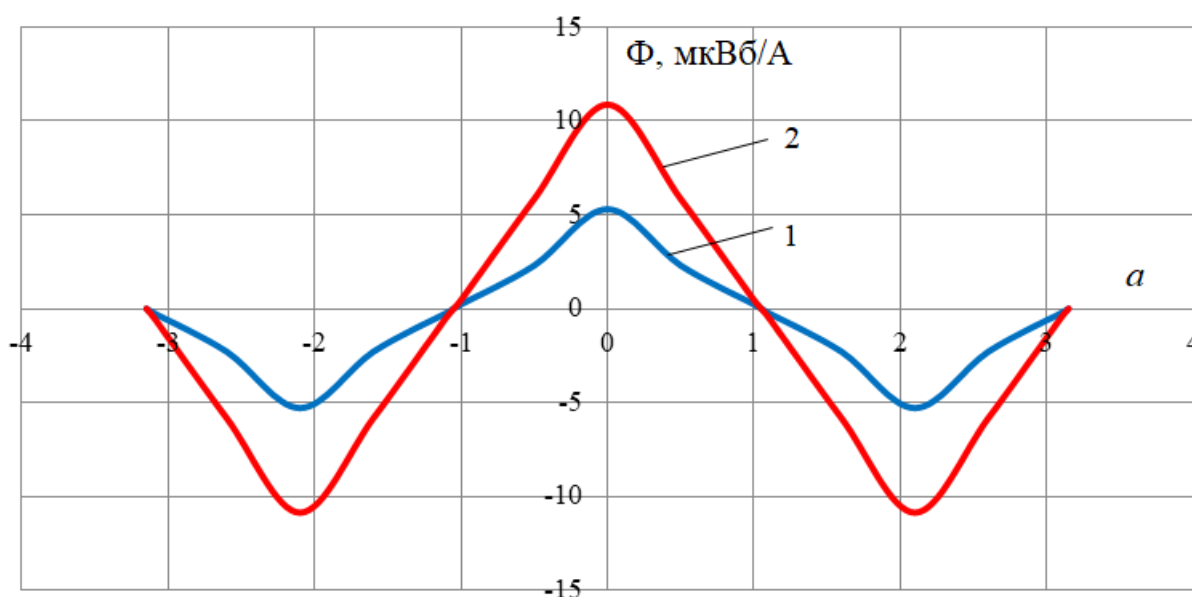


Рис. 5. Зависимость удельного магнитного потока, пронизывающего ПК, от ее относительного смещения для прямоугольной (кривая 1) и двойной 8-образной формы ПК (кривая 2)

Представленные на Рис. 5 кривые достаточно точно могут быть аппроксимированы суммой основной (первой) и третьей гармоник. При расчете ЭДС, наводимой в ПК экипажа, удобнее перейти к абсолютным геометрическим размерам магнитной системы.

Учитывая, что линейное смещение контура ПК относительно контура индуктора связано со скоростью движения экипажа V соотношением $a = Vt$, получим для удельного (в расчете на единицу намагничивающей силы индуктора) магнитного потока выражение:

$$\Phi = \Phi_{(1)} + \Phi_{(3)} = \Phi_{m(1)} \cos\left(\frac{\pi V}{\tau} t\right) + \Phi_{m(3)} \cos\left(\frac{3\pi V}{\tau} t\right) \quad (4)$$

Дифференцируя по времени выражение (4), находим действующие значения ЭДС первой и третьей гармоник магнитного потока, пронизывающего ПК экипажа (в расчете на единицу намагничивающей силы катушки индуктора):

$$\begin{aligned} E_{(1)} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \Phi_{m(1)} \frac{\pi V}{\tau} w_{\text{ПК}} N_{\text{ПК}}, \\ E_{(3)} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \Phi_{m(3)} \frac{3\pi V}{\tau} w_{\text{ПК}} N_{\text{ПК}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $w_{\text{ПК}}$, $N_{\text{ПК}}$ – число витков ПК и число ПК на экипаже.

Действующее значение результирующей ЭДС ПК:

$$E = \sqrt{E_{(1)}^2 + E_{(3)}^2}.$$

Например, для ПК прямоугольной формы при $c=1,0$ м; $d=0,1$ м; $\tau=2(c+0,5d)=2,1$ м имеем: $\Phi_{m(1)}=4,3$ Вб/А; $\Phi_{m(3)}=1,0$ Вб/А. Если ПК имеет $w_{\text{ПК}}=1000$ витков, а намагничивающая сила индуктора составляет $F_n=200$ А, тогда в каждой ПК экипажа при скорости движения $V=100$ м/с (360 км/ч) будет наводиться ЭДС $E=110$ В. Если ПК придать двойную 8-образную форму, то при сохранении тех же основных размеров и той же скорости в каждой ПК экипажа будет наводиться ЭДС $E=215$ В.

Требуемых для питания бортовых потребителей значений ЭДС и тока можно добиться путем последовательного и параллельного соединения нескольких приемных катушек экипажа. Поскольку величина ЭДС зависит от скорости движения экипажа, для стабилизации напряжения питания бортовых потребителей необходимо применение полупроводниковых преобразователей [12–16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Питание бортовых потребителей высокоскоростных магнитолевитационных экипажей при движении со скоростями 200-500 км/ч целесообразно осуществлять от линейных генераторов, основными частями которых являются индуктор (источник переменного-полюсного магнитного поля), размещаемый на путевом полотне, и приемная катушка, размещаемая на экипаже. Предложен вариант линейного генератора, в котором индуктор представляет собой токопровод с транспозицией проводников, питающихся от источников постоянного тока. С целью снижения потерь энергии целесообразно поочередное питание секций протяженного индуктора при движении экипажа. Вариант характеризуется сравнительно невысоким значением ЭДС, наводимой в витке приемной катушки экипажа, поэтому для обеспечения необходимой мощности бортовых потребителей требуется размещать до десяти приемных катушек

на экипаже. Для увеличения ЭДС, наводимой в приемной катушке, предложено придать ей двойную 8-образную форму, что позволит увеличить амплитуду ЭДС почти в два раза по сравнению с простой, прямоугольной формой приемной катушки.

ЭДС, наводимая в приемной катушке экипажа, зависит от скорости его движения, нормальной (к поверхности приемной катушки) компоненты магнитной индукции, числа витков и размеров приемной катушки. Для стабилизации напряжения питания бортовых потребителей при изменяющейся скорости движения экипажа необходим полупроводниковый преобразователь напряжения в виде повышающе-понижающего импульсного преобразователя постоянного напряжения. Целесообразной структурой бортовой энергосистемы магнитолевитационного экипажа является структура «приемная катушка – выпрямитель – импульсный преобразователь – общая шина постоянного тока – бортовые потребители с индивидуальными полупроводниковыми преобразователями».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК/ References

1. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / под ред. Ю.Ф. Антонова, А.А. Зайцева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 612 с. [Zaitsev AA, Antonov YuF, editors. *Magnitolevitacionnyj transport: nauchnye problemy i tekhnicheskie resheniya*. Moscow: FIZMATLIT; 2015. 612 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.10.2023. Доступно по: <http://www.search.rsl.ru>
2. Kluehspies J. Maglev trends in public transport: the perspectives of maglev transportation systems. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(3 suppl. 1):5-15. doi: 10.17816/transsyst201843s15-12
3. Ukita K, Kashiwagi T, Sakamoto Y, Kato Y. Power Transmission Performance Verification of a Non-Contact Power Supply System for Railway Vehicles. *Quarterly Reports of RTRI*, 2016;57(3): 228-233. doi: 10.2219/rtriqr.57.3_228
4. Yoda H, Ukita K. Wireless Power Transfer System for Railway Vehicles with Improved Power Density of Onboard Coil. *Quarterly Reports of RTRI*, 2023;64(1):67-72. doi: 10.2219/rtriqr.64.1_67
5. Никитин В.В., Васильев В.А., Чжао Тяньчжун. Бесконтактная передача энергии на экипажи высокоскоростного магнитолевитационного транспорта // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2022. – № 1. – С. 23–26. [Nikitin VV, Zhao Tianzhong. Wireless Power Transmission to the Carriage of High Speed Magnetolevitational Transport. *Electronics and Electrical Equipment of Transport*. 2022(1):23-26 (Russ., Engl.)]. Ссылка активна на 06.10.2023. Доступно по: <http://www.eet-journal.ru/>
6. Guo L, Lu Q, Ye Y. FEM analysis of the linear generator EMF in Maglev. *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2005, Nanjing, China. Vol. 3, Pp. 2112-2115. doi: 10.1109/ICEMS.2005.202937
7. Song BM, Kratz R, Gurol S. Contactless inductive power pickup system for Maglev applications. *Industry Applications Conference, 2002. 37th Annual Meeting*. 2002, Vol. 3. Pp. 1586-1591. doi: 10.1109/IAS.2002.1043746

8. Yang Y, Dai C, Long Z. Research on Contactless Power Supply System of Medium Speed Maglev Train Based on Inductive Power Transfer 2020 *Chinese Automation Congress (CAC)*, Shanghai, China, 2020. p. 2068-2073. doi: 10.1109/CAC51589.2020.9326922
9. Ying W, Weiguo L, Hongyun H, et al. Research on Contactless Power Supply of High Speed Maglev Train Based on MCR-WPT. 2019 *14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Xi'an, China, 2019. Pp. 2297-2302. doi: 10.1109/ICIEA.2019.8834278
10. Сика З.К., Куркалов И.И., Петров Б.А. Электродинамическая левитация и линейные синхронные двигатели транспортных систем. – Рига: Зинатне, 1988. – 258 с. [Sika ZK, Kourkalov II, Petrov BA. *Elektrodinamicheskaya levitatsija i lineinye sinkhronnye dvigateli transportnykh system*. Riga: ZINATNE; 1988. 258 p. (In Russ.)]. Доступно по: <http://www.search.rsl.ru> Ссылка активна на 06.10.2023.
11. Ким К.К., Карпова И.М. К вопросу разработки систем подвеса на постоянных магнитах для транспортных систем // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – №4. – С. 91–106. [Kim KK, Karpova IM. On the issue of the development of permanent magnet suspension systems for transport systems. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):91-106. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20228491-106
12. Wen YH, Yang X, Long ZQ. Contactless Power Supply Technology and Its Application in Rail Transport. *Electric Drive for Locomotives*, 2016(6):14-20. Доступно по: <http://www.oriprobe.com> Ссылка активна на 06.10.2023.
13. Mi CC, Buja G, Choi SY, Rim CT. Modern advances in wireless power transfer systems for roadway powered electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016; 63(10):6533-6545. doi: 10.1109/TIE.2016.2574993
14. Prasad N, Jain S, Gupta S. Electrical Components of Maglev Systems: Emerging Trends. *Urban Rail Transit*. 2019(5):67-79. doi: 10.1007/s40864-019-0104-1
15. Razek A. Review of Contactless Energy Transfer Concept Applied to Inductive Power Transfer Systems in Electric Vehicles. *Appl. Sci*. 2021;11(7):3221. doi: 10.3390/app11073221
16. Li L., Lu Q. Investigation of Linear Generator for High Speed Maglev Train by 2D Finite Element Model. 12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA); Neuchatel, Switzerland, 2019, p. 1-6, doi: 10.1109/LDIA.2019.8771004

Авторы заявляют, что:

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

Сведения об авторах:

Никитин Виктор Валерьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электротехника и теплоэнергетика»;

eLibrary SPIN: 6864-5678; ORCID:0000-0002-5699-0424;

E-mail: pgups.emks@mail.ru

Чжао Тяньчжун, аспирант кафедры «Электротехника и теплоэнергетика»;

ORCID: 0009-0002-4028-3677;

E-mail: 2115173625@qq.com

Information about the authors:

Victor V. Nikitin, Dr. Sci (Tech.), Associate Professor, Professor of Electrical Engineering and Heat Power Engineering;

eLibrary SPIN: 6864-5678; ORCID:0000-0002-5699-0424;

E-mail: pgups.emks@mail.ru

Tianzhong Zhao, post-graduate student of Electrical Engineering and Heat Power Engineering;

ORCID: 0009-0002-4028-3677;

E-mail: 2115173625@qq.com

Цитировать:

Никитин В.В., Чжао Т. Линейный генератор для энергообеспечения бортовых потребителей высокоскоростных магнитолевитационных экипажей // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 59–71. doi: 10.17816/transsyst20239459-71

To cite this article:

Nikitin VV, Zhao T. Linear Generator for Power Supply to On-Board Consumers of High-Speed Magnetically Levitated Carriages. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(4):59-71. doi: 10.17816/transsyst20239459-71

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

УДК [UDC] 538.953

DOI 10.17816/transsyst20239472-85

© И.К. Михайлова, И.В. Мартиросян, И.А. Руднев,
С.В. Покровский

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

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ТРАНСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО CORC-КАБЕЛЯ

Цель: разработка расчетной модели, расчет и анализ тепловых потерь сверхпроводящего CORC-кабеля на основе стандартных ВТСП-лент и облученных ВТСП-лент в режимах циклической нагрузки, характерных для индукционного накопителя энергии.

Материалы и методы: в качестве образца рассматривается CORC-кабель на основе промышленных оригинальных ВТСП лент и ВТСП с дефектами от радиационного облучения, для описания электромагнитных и тепловых характеристик системы применяются методы макроэлектродинамики, основы прикладной сверхпроводимости, метод конечных элементов, расчет реализован в программе мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics.

Результаты: разработана модель, определен оптимальный режим охлаждения в 5 циклах нагрузки, показано, что наличие искусственных центров пиннинга позволяет существенно улучшить тепловую стабилизацию системы и при рассмотренных схемах охлаждения приводит к снижению тепловых потерь.

Заключение: результаты могут быть использованы при разработке индукционного накопителя энергии на основе высокотемпературных сверхпроводящих композитов (ВТСП).

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, моделирование, Н-формализм, CORC-кабель, сверхпроводящий кабель; ВТСП-ленты; пиннинг, индукционный накопитель.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrotechnology and Electrophysics

© I.K. Mikhailova, I.V. Martirosyan, I.A. Rudnev, S.V. Pokrovskii

National Research Nuclear University MEPhI
(Moscow, Russia)

NUMERICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF RADIATION DEFECTS ON THE TRANSPORT CHARACTERISTICS OF A SUPERCONDUCTING CORC-CABLE

Aim: development of a simultaneous model, calculation and analysis of heat losses of a superconducting CORC cable based on standard HTSC tapes and irradiated HTSC tapes in cyclic load modes for magnetic energy storage system.

Methods: the CORC cable based on industrial original HTSC tapes and HTS tape with defects from irradiation is considered; to describe the electromagnetic and thermal characteristics of the system are used following methods: the concepts of the macroelectrodynamics, the fundamentals of the applied superconductivity, the finite element method are used; the calculation is implemented in the COMSOL Multiphysics.

Results: a model was developed, the optimal cooling mode was determined in 5 load cycles, it was shown that the presence of artificial pinning centers can significantly improve the thermal stabilization of the system and leads to a reduction in heat losses with the considered cooling schemes.

Conclusion: the results can be used in the development of the magnetic energy storage system based on high-temperature superconducting composites (HTS).

Key words: high-temperature superconductor, simulation, H-formulation, CORC-cable, superconducting cable; HTS tapes; pinning, magnetic energy storage.

ВВЕДЕНИЕ

Открытия и исследования в области прикладной сверхпроводимости предлагают новые технологические решения в транспорте и энергетике. Применение сверхпроводников в транспортных и энергетических системах позволяют повышать мощность существующих устройств и снижают негативный экологический эффект. Примерами этих систем являются высоковольтные ЛЭП, магнито-левитационный транспорт, накопители энергии, высокопольные магниты, токамаки на основе сверхпроводников. Сверхпроводящие индукционные накопители энергии активно применяются в ресурсоемких установках и могут улучшить стабильность электроэнергетических систем. Такой накопитель обладает рядом преимуществ перед традиционными накопителями: возможность быстрого импульсного вывода энергии, высокая длительность жизненного цикла, высокие мощность и КПД [1–2]. Для создания катушки индуктивности в сверхпроводящем накопителе активно применяют кабели на основе высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент, инженерная плотность тока которых достигает 10^{12} А/мм. Наиболее перспективными конструкциями ВТСП кабелей для применения в индукционных накопителях энергии являются CORC-кабель (conductor on round core – проводник на круглом сердечнике) и геликоидальный кабель [3–4]. Использование CORC-кабеля в накопителе обусловлено высокими рабочими токами, способностью выдерживать длительные циклические нагрузки, механической гибкостью и удобством реализации охлаждения через формер кабеля [5].

Для прогнозирования рабочих режимов работы накопителя и расчета характеристик всей системы необходимо выполнение анализа параметров

ВТСП-кабеля: численный анализ потерь в различных режимах охлаждения и нагрузки, параметры разрушения сверхпроводящего состояния в критических режимах работы. Это необходимо для корректной проектировки и эксплуатации установки в целом, создания подходящих условий криогенного охлаждения. Поэтому при разработке индукционного накопителя моделирование работы ВТСП кабеля является важным этапом предварительного анализа.

Поскольку одним из основных требований к индукционным накопителям выступает высокая стабильность системы, то необходимо рассматривать способы повышения критических характеристик сверхпроводника. Одним из популярных направлений для ВТСП-лент, а, соответственно, и сверхпроводящих кабелей, является создание дополнительных искусственных центров пиннинга путем радиационного облучения [6].

В настоящей работе представлены результаты моделирования CORC-кабеля в условиях, соответствующих условиям работы индукционного накопителя. На основе полученных результатов сформулированы рекомендации для эксплуатации CORC-кабеля на основе ВТСП лент II поколения с искусственными центрами пиннинга, рассмотрены различные режимы охлаждения, рассчитана рассеянная мощность в кабеле в диапазоне нагрузочных токов свыше 1кА.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

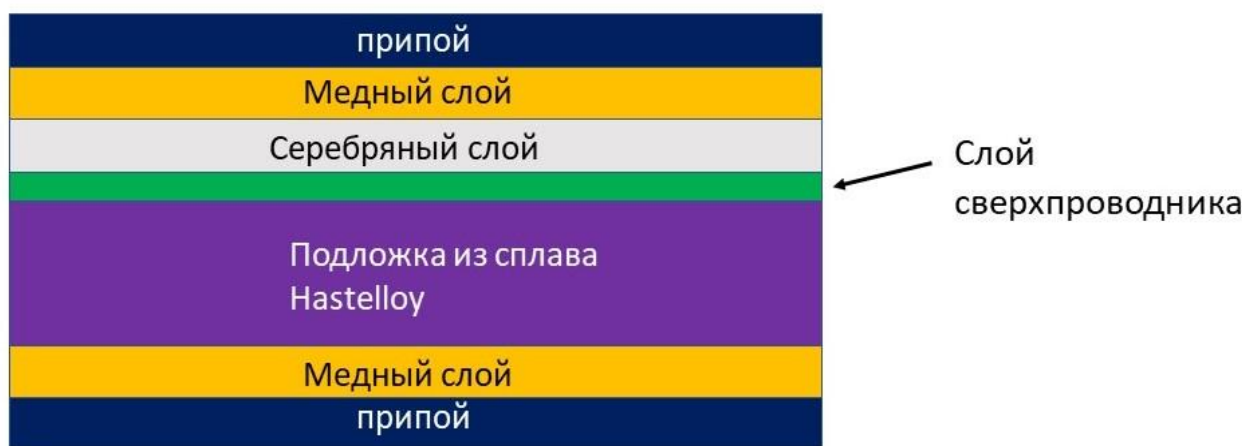


Рис. 1. Архитектура ВТСП ленты

В рамках работы рассматривается CORC-кабель на основе промышленной композитной ВТСП-ленты компании ЗАО «СуперОкс». Архитектура ВТСП композита содержит слои подложки из сплава Хастеллой С276, ВТСП, серебра, меди и припоя в рамках модели (Рис. 1).

Поскольку слой подложки занимает более 60–70 % объема всей ленты, тепловые свойства подложки вносят основной вклад в тепловые характеристики ВТСП-ленты [7]. При проведении расчетов теплопроводность и теплоемкость всей ленты учитывались как теплопроводность и теплоемкость Хастеллоя С276. Плотности слоев ленты модели введены в виде констант $d_{\text{HTS}}=6380 \text{ кг/м}^3$, $d_{\text{Hastelloy}}=8890 \text{ кг/м}^3$, $d_{\text{Cu}}=8900 \text{ кг/м}^3$, $d_{\text{Ag}}=10500 \text{ кг/м}^3$, $d_{\text{solder}}=8500 \text{ кг/м}^3$. Теплопроводность припоя ПОС-61 (61 % олова, 39 % свинца) равна 50 Вт/(м*К) , теплоемкость припоя 250 Дж/(кг*К) , теплоемкость подложки $19,5 \text{ Вт/(м*К)}$.

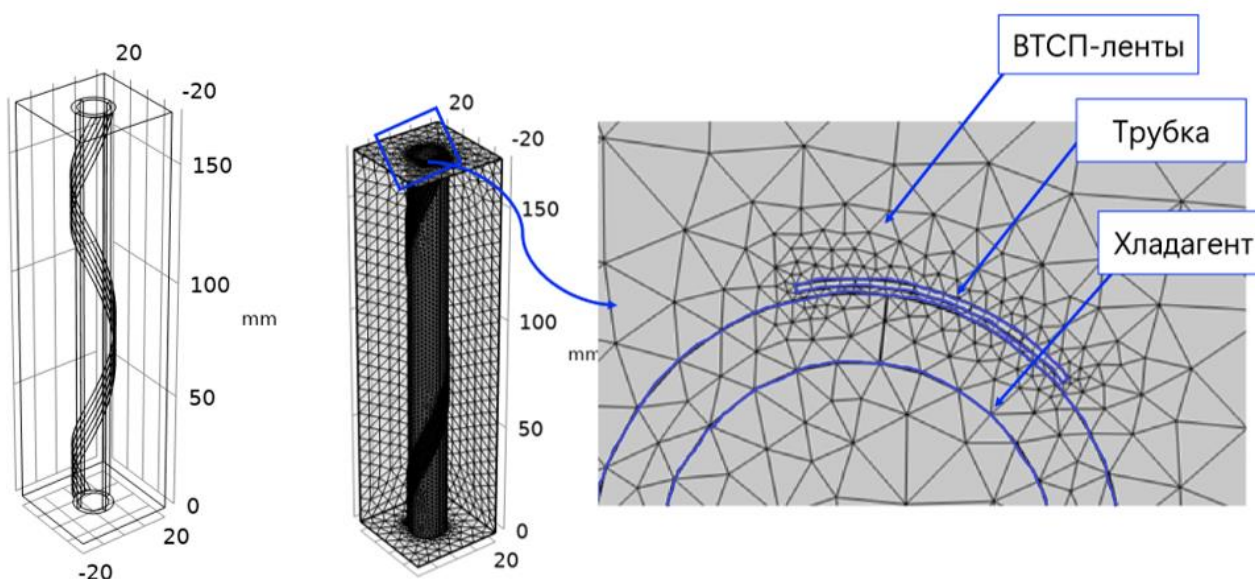


Рис. 2. Исследуемый образец:
слева – геометрия CORC-кабеля; справа – конечно-элементная сетка кабеля с использованием многомасштабного структурирования

Общий внешний вид геометрии CORC-кабеля представлен на Рис. 2. На мельхиоровую трубку внешним радиусом 8 мм и внутренним радиусом 6 мм (зона протекания хладагента) намотана ВТСП-лента сверхпроводящим слоем в сторону канала протекания хладагента. Угол намотки лент составляет 20 градусов, ленты уложены в 5 рядов по 2 слоя. Поскольку моделирование описанной системы выполняется методом конечных элементов (МКЭ), для удобства на Рис. 2 также представлена расчетная конечно-элементная сетка. Для корректного решения задачи используется многомасштабное структурирование сетки модели, при котором изменение размера конечно-элементной сетки контролируется пользователем и определяется геометрией расчетной области. Подробное описание расчетной модели приведено далее.

РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД

Одним из наиболее точных методов численного МКЭ моделирования сверхпроводящих систем является Н-формализм (в качестве зависимых переменных в задаче выступают компоненты напряженности магнитного поля $\mathbf{H}$) [8]. Для решения задачи используется общая форма дифференциальных уравнений в частных производных (PDE) среды инженерного моделирования COMSOL Multiphysics, которая задается как:

$$e_a \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \times \Gamma = F \quad (1)$$

где во всем пространстве в качестве зависимой переменной u при моделировании выбирается напряженность магнитного поля $\mathbf{H}(x,y,z)$ (Н-формализм).

Параметры уравнения (1) подбираются таким образом, что уравнение (1) преобразуется в уравнение Фарадея:

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{E} + \frac{d(\mu_0 \mu_r \mathbf{H})}{dt} = 0 \quad (2)$$

где $\mathbf{E}$ – электрическое поле, $\mathbf{B}$ – индукция магнитного поля, $\mathbf{H}$ – напряженность магнитного поля, μ_0 – магнитная постоянная, μ_r – относительная магнитная проницаемость среды, которая принимается равной 1. Распределение токов $\mathbf{J}$ в сверхпроводнике определяется условиями внешней нагрузки и вычисляется при решении уравнений PDE.

Свойства сверхпроводника описываются с использованием нелинейной зависимости сопротивления от тока для вольтамперной характеристики:

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{|\mathbf{J}|}{J_c} \right)^{n-1} \quad (3)$$

где E_c – критическое электрическое поле, равное 1 мкВ/см, J_c – критический ток, компоненты тока $\mathbf{J}$ вычисляются на основе закона Ампера (2), n – показатель степени, который мы подробнее рассмотрим при обсуждении учета радиационного пиннинга. Начальное условие:

$$\mathbf{H}|_{t=0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Магнитное поле вычисляется как суперпозиция внешних и внутренних вкладов. Внутренний вклад $\mathbf{H}_s = [H_{sx}, H_{sy}, H_{sz}]$ вычисляется на основе закона Ампера. Тогда как внешний вклад можно записать как $\mathbf{H}_e = [H_{ex}, H_{ey}, H_{ez}]$. Граничные условия принимают вид:

$$\mathbf{H}|_{\partial\Omega} = \begin{bmatrix} H_{sx} + H_{ex} \\ H_{sy} + H_{ey} \\ H_{sz} + H_{ez} \end{bmatrix} \quad (4)$$

В основе описания физики тепловых процессов заложено выражение:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \times (-k \nabla T) = Q + \rho C_p w \nabla T \quad (5)$$

где C_p – теплоемкость при постоянном давлении, ρ – плотность, k – коэффициент теплопроводности, w – поле скорости температур, Q – все источники тепла, включая термоэлектрические.

Тепловыделения в системе рассчитывается по формуле:

$$Q = E \times J \quad (6)$$

При расчете используется двухсторонняя связка электродинамических и тепловых процессов, учитывается зависимость критического тока от температуры.

Приложение токовой нагрузки реализуется на протяжении 5 циклов в течение 20 секунд в виде функции следующего вида (Рис. 3).

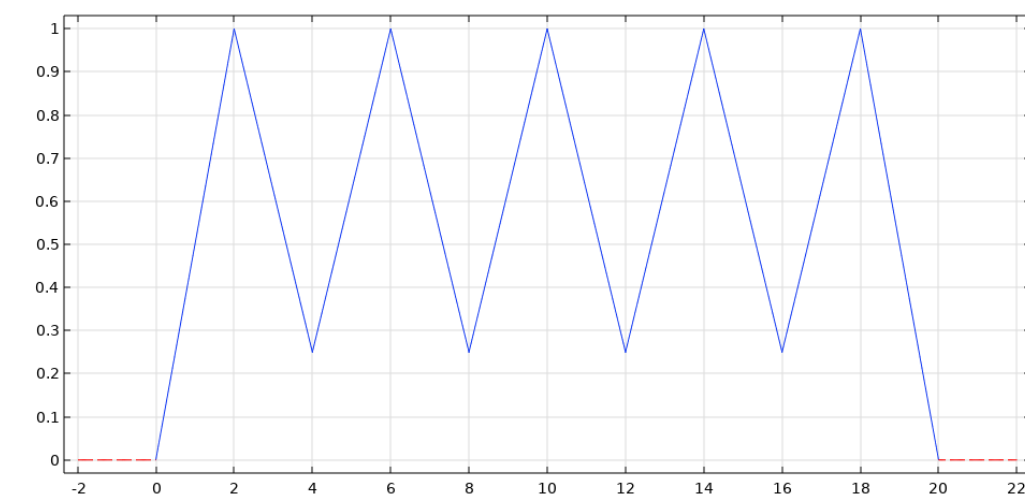


Рис 3. Временная зависимость для прикладываемой нагрузки в течение 5 циклов, общий вид приложенной функции в относительных единицах

Ранее [9, 10] было показано, что изменение параметров пиннинга, в том числе при радиационном облучении, можно представить в виде учета зависимости показателя степени вольт-амперной характеристики (n-value) в уравнении (3) как:

$$n \sim \frac{U_0}{kT} \quad (7)$$

U_0 – энергия пиннинга сверхпроводника при плотности тока $J=0$ [А], k – константа Больцмана, T – температура в модели (77,4 [К]).

На основе описанных подходов выполняется моделирование ВТСП CORC-кабеля при приложении токовой нагрузки с варьируемой максимальной амплитудой тока от 1 кА до 1,2 кА. Для реализации циклической нагрузки максимальная амплитуда тока умножается на функцию, представленную на Рис. 3. В качестве хладагента, протекающего

по мельхиоровой трубке, в рамках представленной работы рассматриваются жидкий азот и жидкий неон. Рассматриваются ВТСП кабели на основе оригинальных (необлученных) и облученных ВТСП лент.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет для 5 циклов нагрузки проводился в двух температурных режимах: при охлаждении жидким азотом и жидким неоном. Первоначально был проведен расчет нагрева и потерь рассеянной мощности CORC кабеля при охлаждении жидким азотом в условиях отсутствия радиационного пиннинга лент при амплитуде тока 1 кА. В начальный момент времени кабель охлажден до температуры жидкого азота, а после начала пропускания тока осуществляется прокачка жидкого азота внутри мельхиоровой трубки с коэффициентом теплопередачи 50 $[W/(m^2 \cdot K)]$. Через 2 сек. (конец первого цикла нагрузки, когда приложенный ток равен нулю) максимальная температура системы составляет 83,3 К (Рис. 4а), что не превышает критическую температуру сверхпроводника, но приводит к снижению критического тока. Поэтому в последнем цикле нагрузки в момент времени $t = 20$ сек. максимальная температура составляет 93 К (Рис. 4б), что превышает критическую температуру ВТСП лент.

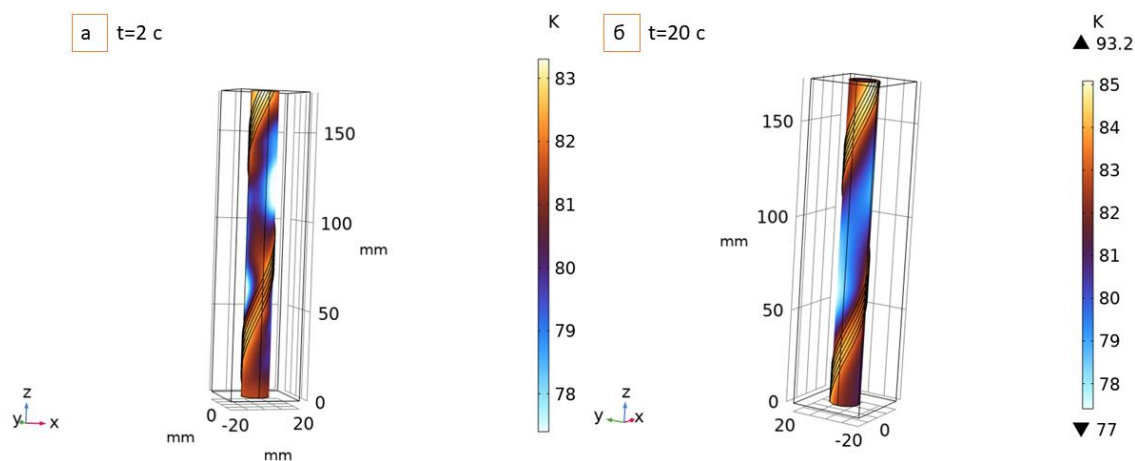


Рис. 4. Распределения температур в CORC кабеле при амплитуде нагрузки 1 кА, хладагент-жидкий азот, а-время нагрузки 2 секунды, б-время нагрузки 20 секунд

Рассмотрим зависимости рассеянной мощности кабеля при приложении токовой нагрузки в 5 циклах (Рис. 5). В момент времени, соответствующий максимальной амплитуде тока, тепловыделение также максимально. Поскольку нагрузка реализуется циклическим образом, необходимо рассмотреть отвод тепла во время снижения нагрузки. Охлаждающая система должна полностью стабилизировать кабель для

поддержания тех же нагрузочных характеристик в течение последующих циклов эксплуатации.

Стоит обратить внимание на две характерные особенности: в первом цикле после снижения нагрузки наблюдается локальное поддержание выделения мощности (обозначено цифрой 1). До тех пор, пока растет приложенная нагрузка, неизбежно продолжается и рост напряжения. За это время локальное тепловыделение в лентах (вплоть до надкритической температуры) приводит к локальному снижению критического тока лент.

При снижении токовой нагрузки всплески локального тепловыделения начинают распределяться по объему образца. Локальная температура начинает снижаться за счет охлаждения посредством теплопроводности твердого тела, при этом средняя температура образца снижается медленнее, поскольку, с одной стороны, осуществляется интенсивное охлаждение жидким хладагентом при снижающейся токовой нагрузке, а, с другой стороны, имеет место теплоприток от, так называемых, «горячих пятен». Перераспределение тепла внутри лент приводит к тому, что средний критический ток каждой ленты продолжает снижаться еще некоторое короткое время в процессе снятия нагрузки.

В первом цикле такая ситуация наблюдалась в момент полного вывода тока и тепло было практически полностью отведено криогенной системой до начала второго цикла. За последующие два цикла ВТСП нагревается до температуры, близкой к критической, поэтому критический ток всего проводника ниже, чем в начале первого цикла нагрузки. Во всем объеме образца происходит аккумуляция выделившегося тепла, поэтому напряжение на нем не может вернуться на первоначальный уровень до тех пор, пока тепло не будет отведено криогенной системой. Этим явлением обусловлен тот факт, что в момент времени t порядка 12 секунд (обозначено цифрой 2 на Рис. 5) несмотря на продолжающееся снижение транспортного тока, мощность, выделяемая на образце, перестает снижаться и выходит на планку. Проводник, таким образом, находится на пороге динамической тепловой неустойчивости до тех пор, пока тепло, сгенерированное за все циклы нагрузки, не будет отведено и критический ток не восстановится, а напряжение на образце с пониженным критическим током продолжает сохраняться.

Максимальная температура образца после 5 циклов токовой нагрузки составила 93,8 К, что превышает критическую температуру сверхпроводника – наблюдается локальный перегрев ВТСП лент.

Области на внешней поверхности мельхиоровой трубки, не находящиеся в прямом контакте с образцом, имеют температуру, равную температуре жидкого азота после проведения всех 5 циклов (Рис. 6 б), что свидетельствует об установлении теплового равновесия между хладагентом и трубкой.

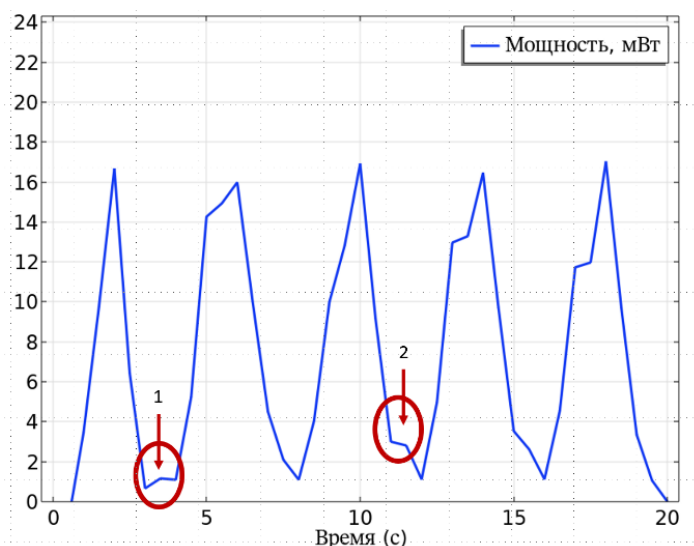


Рис. 5. Временная зависимость рассеянной мощности CORC-кабеле при охлаждении жидким азотом и максимальной амплитуде тока в 1кА для 5 циклов нагрузки

Это обозначает, что перегрев системы обусловлен именно аккумуляцией тепла в проводнике, а не изначальным отсутствием возможности охлаждения кабеля до температуры жидкого азота.

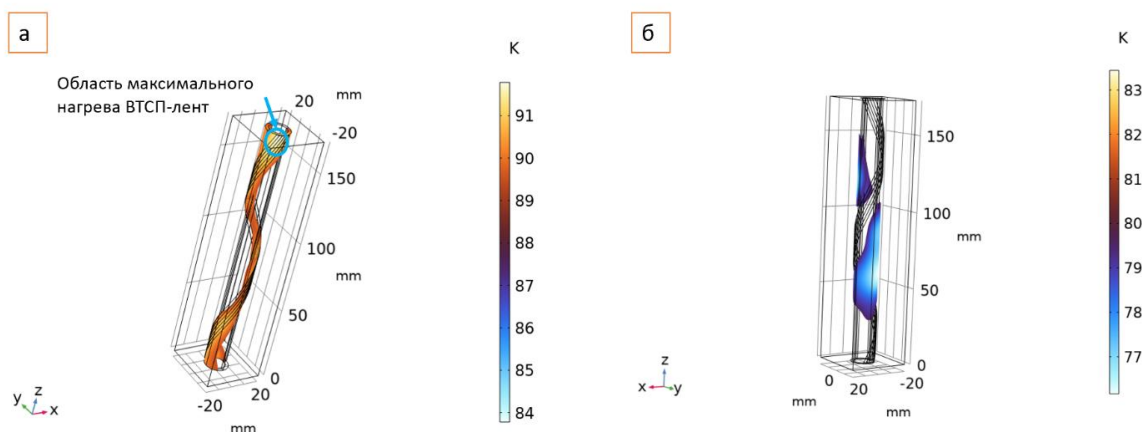


Рис. 6. Температурное распределение в CORC кабеле при амплитуде нагрузки 1кА, хладагент-жидкий азот, а-распределение температур в лентах, б-распределение наиболее «холодных» зон в мельхиоровой трубке

Полученные результаты показывают, что для стабилизации кабеля требуется изменение режимов нагрузки и/или охлаждения. В частности, необходимо либо понижать пропускаемый ток, либо использовать другой хладагент с более низкой температурой кипения, так как в рассмотренных условиях сверхпроводник находится в подкритическом режиме работы.

Другим вариантом повышения стабильности системы является использование ВТСП элементов с более высокими критическими характеристиками. Одним из способов повышения критических характеристик ВТСП является радиационное облучение. В этом случае за

счет формирования дополнительных искусственных центров пиннинга может наблюдаться повышение критического тока [11–15]. Ранее было продемонстрировано повышение критического тока облученных образцов в различных магнитных полях и проведено исследование значений энергии пиннинга. В собственном магнитном поле энергия пиннинга образцов, аналогичных представленным в настоящей работе, составляет $U_0 = 8$ мэВ [10]. Рассмотрим транспортные и тепловые характеристики ВТСП CORC-кабеля в собственном магнитном поле с учетом эффектов радиационного пиннинга. В качестве хладагента так же, как и в предыдущем случае, выступает жидкий азот, максимальная амплитуда тока варьируется от 1 кА до 1,2 кА. Зависимости выделившейся мощности от времени для граничных случаев приведены на Рис. 7. Наличие радиационных дефектов приводит к повышению критических характеристик ВТСП, что, в свою очередь, обеспечивает тепловую стабилизацию системы, выраженные области тепловой неустойчивости и свидетельства перехода лент в подкритическое состояние отсутствуют. Стабильное улучшение тепловых, и как следствие, транспортных характеристик ВТСП кабеля сохраняется во всем рассмотренном диапазоне приложенных нагрузок. Таким образом, повышение критического тока образца, связанное с наличием радиационных дефектов, позволяет кабелю находиться в стабильном тепловом режиме при длительных циклических воздействиях.

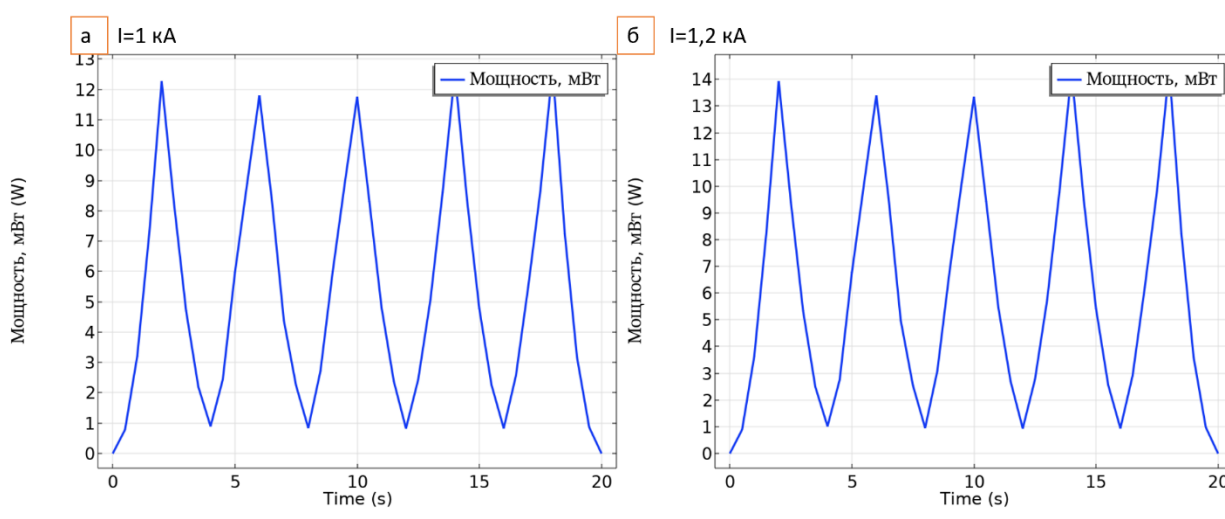


Рис. 7. Временные зависимости рассеянной мощности (мВт) для облученного образца CORC-кабеля при охлаждении жидким азотом (5 циклов токовой нагрузки амплитуды 1 кА(а) и 1,2 кА(б))

Наличие радиационных дефектов (Рис. 7 а) приводит к снижению рассеянной мощности в сравнении с необлученным образцом при эквивалентном режиме нагрузки на $\sim 30\%$ (Рис. 5). Кроме того, при увеличении амплитуды транспортного тока на 20% (Рис. 7 б) наблюдается снижение максимальной рассеянной мощности на $\sim 20\%$ (Рис. 5) в

сравнении с необлученным образцом. Таким образом, показана возможность снижения потерь в ВТСП кабеле не только в аналогичных режимах работы, но и при увеличении токовой нагрузки.

При изменении схемы охлаждения с жидкого азота на жидкий неон наблюдается дополнительное подавление динамической тепловой неустойчивости в системе (Рис. 8). При тех же параметрах энергии пиннинга и внешней нагрузки (амплитуда тока 1 кА) продемонстрировано более чем двукратное снижение мощности тепловыделения (Рис. 7а, 8б). Зависимости рассеянной мощности от времени для образцов стандартного и облученного ВТСП кабелей показывают улучшение токонесущей способности и тепловой стабильности ленты с радиационными дефектами. Повышение критических характеристик ВТСП путем радиационного облучения лент и использование оптимального режима охлаждения позволяет снизить потери образца более чем в 3,7 раза и достичь полного отсутствия локальных горячих зон (Рис. 6, 8а).

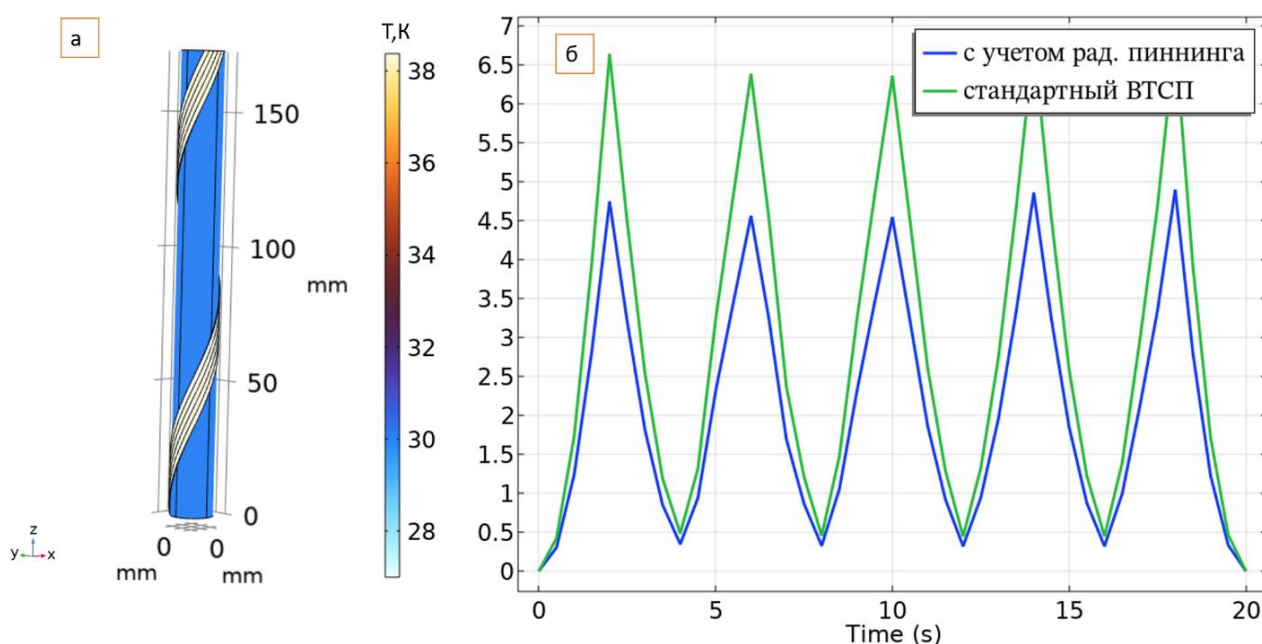


Рис. 8. Результаты моделирования ВТСП CORC-кабеля при охлаждении жидким неоном (5 циклов токовой нагрузки амплитуды 1 кА): а – распределение температуры в облученном образце; б – временные зависимости рассеянной мощности (мВт) для стандартного и облученного образцов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В программном пакете COMSOL Multiphysics реализована мультифизическая модель CORC-кабеля на основе ВТСП лент 2-ого поколения. В модели учитывается слоистая структура ВТСП лент, рассмотрено влияние эффектов радиационного пиннинга на транспортные характеристики ВТСП кабеля. Охлаждение кабеля реализовано при двух

хладагентах: жидкий азот и жидкий неон. Результаты моделирования транспортных характеристик CORC-кабеля на основе необлученных ВТСП лент при охлаждении жидким азотом показывают превышение критической температуры ВТСП элементов при пропускании циклической токовой нагрузки амплитуды 1 кА. Использование кабеля на основе ВТСП-лент с радиационными дефектами повышает тепловую стабильность системы при том же режиме охлаждения, что снижает рассеянную мощность более чем на 30 %. Смена схемы охлаждения кабеля на жидкий неон позволяет снизить рассеянную мощность более чем в два раза, а также позволяет пропускать на 20 % более высокий ток с более низкими потерями, чем для необлученного образца в том же режиме охлаждения.

Расчетная модель, учитывающая эффект радиационного пиннинга сверхпроводника, позволяет прогнозировать параметры, при которых CORC-кабель работает в стабильном тепловом режиме и ВТСП ленты не переходят в нормальное состояние.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

Расчеты влияния радиационных дефектов на транспортные характеристики сверхпроводящего CORC-кабеля выполнены при финансировании ОИЯИ по программе поддержки в рамках коллаборации «Ариадна».

Авторы заявляют что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Mukherjee P, Poulomi, 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
2. Zhu J, Qiu M, Wei B, et al. Design, dynamic simulation and construction of a hybrid HTS SMES (high-temperature superconducting magnetic energy storage systems) for Chinese power grid. *Energy*. 2013;51:184-192. doi:10.1016/j.energy.2012.09.044
3. Uglietti D. A review of commercial high temperature superconducting materials for large magnets: from wires and tapes to cables and conductors. *Superconductor Science and Technology*. 2019;32(5):053001. doi: 10.1088/1361-6668/ab06a2

4. Wang X, Sheng J, Li XF, et al. Study on field-based superconducting cable for magnetic energy storage devices. *Journal of Energy Storage*. 2023;58:106386. doi: 10.1016/j.est.2022.106386
5. Van Der Laan DC, McRae DM, Weiss JD. Effect of transverse compressive monotonic and cyclic loading on the performance of superconducting CORC® cables and wires. *Superconductor Science and Technology*. 2018;32(1):015002. doi: 10.1088/1361-6668/aae8bf
6. Liu L, Liu J, Zhai P, et al. The variation of pinning efficiency in YBCO films containing columnar defects. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2022;592:1354000. doi: 10.1016/j.physc.2021.1354000
7. Lu J, Choi ES, Zhou HD. Physical properties of Hastelloy® C-276™ at cryogenic temperatures. *Journal of applied physics*. 2008;103:6. doi: 10.1063/1.2899058
8. Shen B, Grilli F, Coombs T. Overview of H-formulation: A versatile tool for modeling electromagnetics in high-temperature superconductor applications. *IEEE access*. 2020;8:100403-100414. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2996177
9. Chudy M, Zhong Z, Eisterer M, et al. n-Values of commercial YBCO tapes before and after irradiation by fast neutrons. *Superconductor Science and Technology*. 2015;28(3):035008. doi: 10.1088/0953-2048/28/3/035008
10. Attanasio C, Salvato M, Ciancio R, et al. Pinning energy and irreversibility line in superconducting GdSr₂RuCu₂O₈. *Physica C: Superconductivity and its applications*. 2004;411(3-4):126-135. doi: 10.1016/j.physc.2004.07.004
11. Umezawa A, Crabtree GW, Liu JZ, et al. Anisotropy of the Lower Critical Field in YBa₂Cu₃O_{7-δ}. *High-T_c Superconductors*. 1988;253-259. doi: 10.1007/978-1-4899-0846-9_33
12. Kirk M. Structure and flux pinning properties of irradiation defects in YBa₂Cu₃O_{7-x}. *Cryogenics*. 1993;33(3):235-242. doi: 10.1016/0011-2275(93)90037-O
13. Crabtree GW, Kwok WK, Welp U, et al. Anisotropic twin boundary pinning in YBa₂Cu₃O_x. *Physica C: Superconductivity*. 1991;185:282-287. doi: 10.1016/0921-4534(91)91986-E
14. Hasan MK, Shobaki J, Al-Omari, et al. The rotational magnetic process and effects of-irradiation on vortex flux pinning in Tl-2223 at low temperatures. *Superconductor Science and Technology*. 1999;12(9):606. doi: 10.1088/0953-2048/12/9/306
15. Civalé L, Marwick AD, Worthington TK, et al. Vortex confinement by columnar defects in YBa₂Cu₃O₇ crystals: Enhanced pinning at high fields and temperatures. *Physical Review Letters*. 1991;67(5):648. doi: 10.1103/PhysRevLett.67.648

Сведения об авторах:

Михайлова Ирина Константиновна, магистр, инженер-исследователь;

eLibrary SPIN: 2846-2594; ORCID: 0000-0002-3222-678X;

E-mail: ikmikhailova@mephi.ru

Мартиросян Ирина Валерьевна, кандидат физико-математических наук;

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

E-mail: mephizic@gmail.com

Руднев Игорь Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор;

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

E-mail: iarudnev@mephi.ru

Покровский Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук;

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

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Information about the authors:

Irina K. Mikhailova, Master's Student, Research Engineer;
eLibrary SPIN: 2846-2594; ORCID: 0000-0002-3222-678X;
E-mail: ikmikhailova@mephi.ru

Irina V. Martirosian, PhD in Physics and Mathematics, Research Engineer;
eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;
E-mail: mephizic@gmail.com

Igor A. Rudnev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor;
eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;
E-mail: iarudnev@mephi.ru

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

Цитировать:

Михайлова И.К., Мартиросян И.В., Руднев И.А., и др. Численный анализ влияния радиационных дефектов на транспортные характеристики сверхпроводящего CORC-кабеля // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 72–85. doi: 10.17816/transsyst20239472-85

To cite this article:

Mikhailova IK, Martirosyan IV, Rudnev IA, et al. Numerical Analysis of the Influence of Radiation Defects on the Transport Characteristics of a Superconducting CORC-Cable. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(4):72-85. doi: 10.17816/transsyst20239472-85

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

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

УДК [UDC] 624.04 (075.8)

DOI 10.17816/transsyst20239486-93

© Ю.В. Тряпицын, Д.А. Тряпкин

Дальневосточный государственный университет путей сообщения
(Хабаровск, Россия)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТА ЛЕДОВЫХ ПЕРЕПРАВ

Обоснование: В зимний период на севере Дальневосточного региона открываются ледовые переправы. В большинстве случаев они организуются из-за отсутствия капитальных мостов. Для доставки грузов и пассажиров в отдаленные населенные пункты, где плохо развита дорожная сеть и ограниченный срок навигации используются ледовые переправы, т.к. чтобы добраться до населенных пунктов необходимо пересекать водоемы. Ледовые переправы остаются единственным способом связи таких населенных пунктов с городами большой численностью населения. Наиболее надежным способом увеличения несущей способности является вмораживание наплавного моста шарнирной схемы в ледовый покров. Преимуществом таких переправ является малая чувствительность к климатическим условиям и природе водного потока, малость кренов и осадок. В настоящее время данные переправы используются на трансграничных переходах Дальнего Востока, но методики расчета их нет.

Цель: Разработка методики, которая совершенствовала бы расчет ледовых переправ с учетом усиления в виде металлических понтонных конструкций состоящих из шарнирных паромов на двух опорах.

Материалы и методы: В статье приводится модель расчета. Расчетная схема: металлическая конструкция, вмороженная в лед лежащая на воде, представляет из себя жесткий штамп на плите, лежащей на упругом основании переправы. Для подтверждения принятой модели расчета был проведен эксперимент реальной переправы в виде статических испытаний.

Результаты: В статье представлены результаты определения прогибов переправы по принятой модели расчета и после проведения эксперимента. Также была рассчитана грузоподъемность усиленной переправы по месяцам.

Заключение: Данное исследование поможет проводить расчеты комбинированных переправ для значительного увеличения несущей способности.

Ключевые слова: прогиб, двухопорный паром, ледовая переправа, несущая способность, расчетная схема, наплавной мост.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

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

© Yu.V. Tryapitsyn, D.A. Tryapkin

Far Eastern State Transport University
(Khabarovsk, Russia)

IMPROVEMENT OF THE CALCULATION OF ICE CROSSINGS

Background: In winter, ice crossings open in the north of the Far Eastern region. In most cases, they are organized due to the lack of capital bridges. Ice crossings are used to deliver goods and passengers to remote settlements where the road network is poorly developed and the navigation period is limited, because to get to settlements it is necessary to cross reservoirs. Ice crossings remain the only way to connect such settlements with cities with a large population. The most reliable way to increase the load-bearing capacity is to freeze the floating bridge of the articulated circuit into the ice cover. The advantage of such crossings is low sensitivity to climatic conditions and the nature of the water flow, small rolls and sediment. Currently, these crossings are used at cross-border crossings of the Far East, but there are no calculation methods.

Aim: Development of a methodology that would improve the calculation of ice crossings, taking into account the reinforcement in the form of metal pontoon structures consisting of articulated ferries on two supports.

Materials and Methods: The article provides a calculation model. Design scheme: a metal structure frozen in ice lying on water is a rigid stamp on a plate lying on the elastic base of the crossing. To confirm the accepted calculation model, an experiment of a real crossing in the form of static tests was carried out.

Results: The article presents the results of determining the crossing deflections according to the accepted calculation model and after the experiment. The carrying capacity of the reinforced ferry was also calculated by months.

Conclusion: This study will help to carry out calculations of combined crossings for a significant increase in load-bearing capacity.

Key words: deflection, double-support ferry, ice crossing, load-bearing capacity, design scheme, floating bridge.

ВВЕДЕНИЕ

В зимний период на севере Дальневосточного региона открываются ледовые переправы. В большинстве случаев они организуются из-за отсутствия капитальных мостов. Для доставки грузов и пассажиров в отдаленные населенные пункты, где плохо развита дорожная сеть и ограниченный срок навигации используются ледовые переправы, т.к. чтобы добраться до населенных пунктов необходимо пересекать водоемы [1]. Ледовые переправы остаются единственным способом связи таких населенных пунктов с городами большой численностью населения. Для проезда тяжелой техники через водные препятствия нужно, чтобы лед был достаточно толстый и прочный, а также имел минимальное количество трещин. И чтобы достигнуть данного эффекта переправы нужно усиливать либо намораживанием льда поверх естественного [2], либо вмораживанием массивов дерева [3]. Данные способы усиления ледовых переправ не дадут желаемого эффекта увеличения несущей способности для пропуска тяжелой техники и регулярного использования ледовой переправы [4]. Для того, чтобы значительно увеличить несущую способность данных переправ нужно

В настоящее время данные переправы используются на трансграничных переходах Дальнего Востока, но методики расчета их нет и задача состоит в том, чтобы разработать методику, которая бы совершенствовала расчет ледовых переправ с учетом усиления в виде металлических понтонных конструкций состоящих из шарнирных паромов на двух опорах.

Производится разбиение опорных элементов конструкции на равные части напоминающие квадрат (рис. 1). В центре масс частей разбиения прикладывается активная нагрузка в виде сосредоточенной силы от подвижной нагрузки и распределенной по площади окружности, от нагрузки которая действует по площади части разбиения [7, 8].

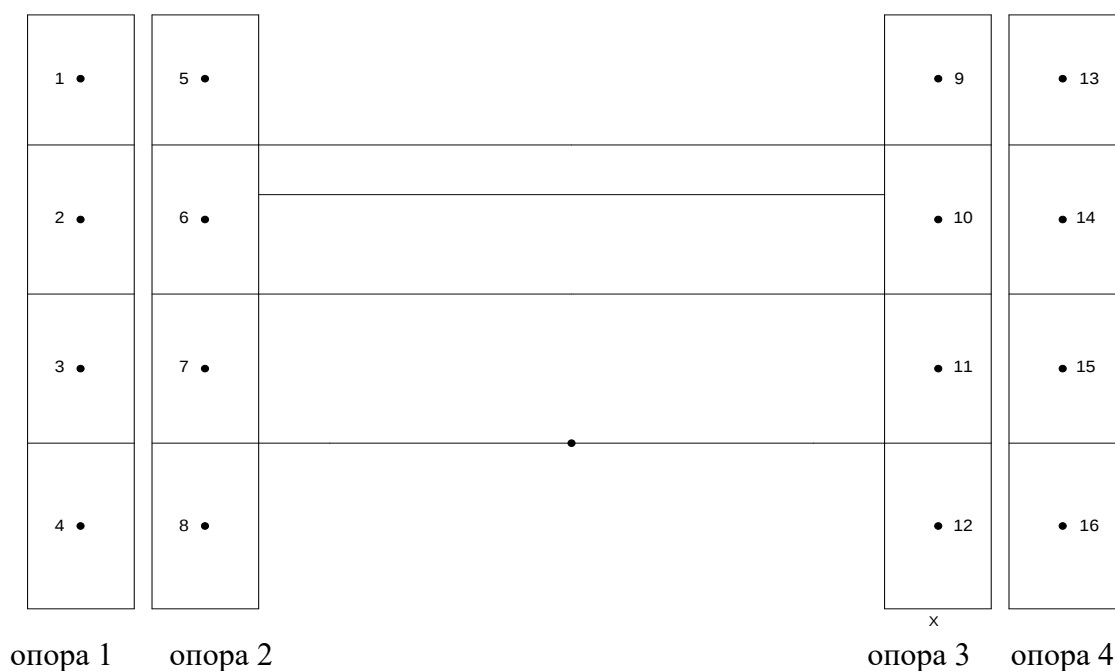


Рис. 1. Сетка разбиения двухопорного парома

После того как провели разбиение опор наплавного моста определяют величины радиального и тангенциального моментов с учетом табличных функций $(f_0'(\alpha), g_0^{[M]}(\xi_k), g_0^{[M]}(\xi_k))$ используемых для вычисления изгибающих моментов в теории изгиба плит на упругом винклеровском основании [9–11].

Формулы для определения величин моментов:

$$G_r = G(0) - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n P \cdot g_0^{[M]}(\xi_k); \quad G_r = G(0) - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n P \cdot g_0^{[M]}(\xi_k),$$

где $G(0) = -\frac{ql^2}{4} \pi \alpha (1 + \alpha) f_0'(\alpha)$ – изгибающий момент определяемый через равномерно распределенную по контуру приведенного радиуса нагрузку q и приведенный радиус эквивалентного круга $\alpha = r_{\text{экв}}/l$, $r_{\text{экв}}$ – радиус эквивалентного круга, P – сосредоточенная нагрузка, $\xi_k = r_k/l$ – приведенное расстояние между точкой, в которой определяются усилия или перемещения, и точкой, в которой приложено внешнее воздействие, l – характеристика гибкости льда, r_k – расстояние между точками.

Величина допускаемого изгибающего момента определяется [12]:

$$[M] = \frac{R_f \cdot h^2}{6 \cdot 2,5},$$

где R_f – нормативное сопротивление льда изгибу, h – толщина льда.

Затем под действием системы сосредоточенных сил используя табличную функцию $f_0(\xi_k)$ [9], цилиндрическую жесткость (D) и характеристику гибкости (l) определяются прогибы:

$$w = \frac{l^2}{4D} \sum_{i=1}^n P \cdot f_0(\xi_k). \quad (1)$$

Допускаемый прогиб принимаем $[f] = h/4$.

По формуле (1) были определены прогибы ледового слоя с усилением путем вмораживания наплавного моста и без усиления при разной толщине льда, результаты приведены в Табл.

Таблица. Расчет прогибов

h, см		35	55	83
D, кгс/см ²		$2356 \cdot 10^5$	$9393 \cdot 10^5$	$31417 \cdot 10^5$
l, см		696,7	984,5	1331,3
$\sum f_0(\xi) \cdot P$, кг	С усилением	7619,73	10606,8	12797,5
	Без усиления	11863	13384,7	14382,8
Прогиб w, см	С усилением	3,92	2,74	1,8
	Без усиления	6,11	3,45	2,03

По различным месяцам была рассчитана грузоподъемность комбинированной переправы от осевой нормативной нагрузки от автотранспортных средств (Рак) и осевой нормативной нагрузки от

автотранспортных средств, осуществляющих перевозки тяжеловесных грузов, пропускаемых в специальном режиме (Рнк). Для расчета использовалось условие прочности льда. Результаты расчета приведены на графике (Рис. 2).

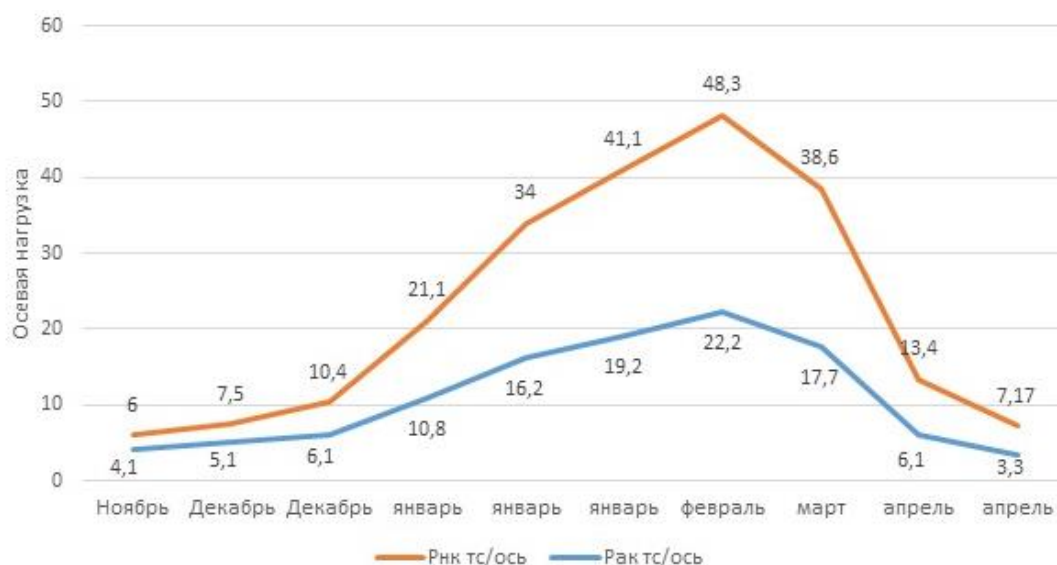


Рис. 2. График грузоподъемности усиленной ледовой переправы

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для подтверждения принятой модели расчета данных переправ был проведен эксперимент в виде статических испытаний на действующей ледовой переправе, усиленной рассматриваемым способом. Эксперимент проводился при толщине льда 83 сантиметра. В процессе проведения испытания измерительными приборами снималась осадка понтона. Датчики системы «ФАЗА» и прогибомеры размещались согласно Рис. 3.

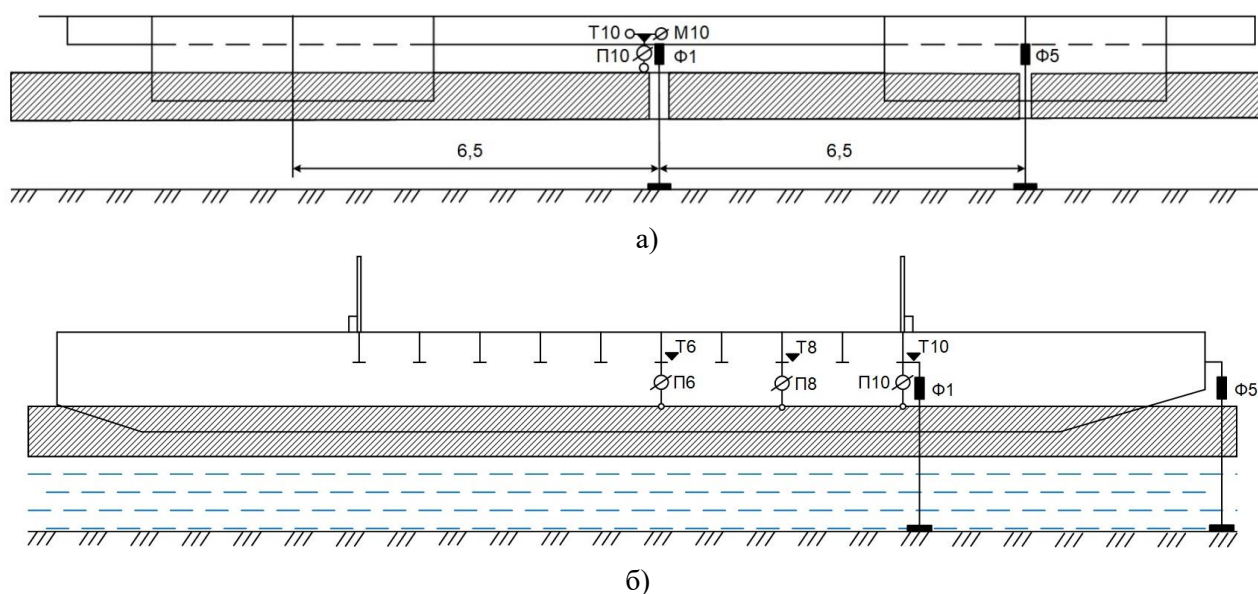


Рис. 3. Схема размещения измерительных приборов:
а) поперек пролетного строения, б) вдоль пролетного строения

После проведения эксперимента результат показал, что прогиб усиленной переправы составил 1,6 см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был разработан усовершенствованный расчет ледовых переправ с учетом усиления (вмораживанием наплавного моста).

Высокая сходимость аналитического и экспериментального результатов расчета прогиба усиленной ледовой переправы говорит о том, что модель расчета для рассматриваемой расчетной схемы выбрана правильно.

Авторы заявляют, что:

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

Библиографический список / References

1. Лузганов А.А. Обустройство ледовых переправ в условиях крайнего севера // Арктика и Север. – 2011. – № 3. – С.1–9. [Luzganov AA. Obustroistvo ledovykh pereprav v usloviyakh krainego severa. *Arktika i Sever*. 2011;3:1-9. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17101104> Ссылка активна на: 30.11.2023.
2. Хафизов Э.Р., Миннуллин Э.Р. Намораживание, как способ усиления ледовых переправ // В сборнике: Академическая наука – проблемы и достижения. Материалы XXI международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 75–76. [Khafizov EhR, Minnullin EhR. Namorazhivanie, kak sposob usileniya ledovykh pereprav. V sbornike: *Akademicheskaya nauka - problemy i dostizheniya*. Materialy XXI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 2019. pp. 75-76. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 30.11.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41340256>
3. Харенко П.С., Черватюк Л.М. Способ усиления ледовой переправы // В сборнике: Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования. Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – 2012. – С. 150–155. [Kharenko PS, Chervatyuk LM. Sposob usileniya ledovoi perepravy // V sbornike: *Razvitie dorozhno-transportnogo kompleksa i stroitel'noi infrastruktury na osnove ratsional'nogo prirodoopol'zovaniya*. materialy VII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem). 2012. pp. 150-155. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=yklijh&ysclid=lpkdwerr5l335307162> Ссылка активна на: 30.11.2023.
4. Федотова Е.А., Киселев П.В., Понятов А.Г. Методы усиления ледяного покрова водных переходов временных зимних дорог // В сборнике: Наземные транспортно-технологические комплексы и средства. Материалы международной научно-технической конференции. Министерство образования и науки РФ; Тюменский индустриальный университет. – 2016. – С. 316–319. [Fedotova EA, Kiselev PV, Ponyatov AG. Metody usileniya ledyanogo pokrova vodnykh perekhodov vremennykh

- zimnikh dorog // V sbornike: *Nazemnye transportno-tekhnologicheskie komplekсы i sredstva*. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Ministerstvo obrazovaniya i nauki RF; Tyumenskii industrial'nyi universitet. 2016. pp. 316-319. (In Russ.)). Ссылка активна на: 30.11.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26011968>
5. Skinner LB, Benmore CJ, Shyam B, Weber JKR, Parise JB: Structure of the floating water bridge and water in an electric field. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2012;41(109):16463-16468. doi: 10.1073/pnas.1210732109
 6. Малофеев А.Г., Якименко О.В. Несущая способность ледовых переправ // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2009. – № 1(11). – С. 32–36. [Malofeev AG, Yakimenko OV. Nesushchaya sposobnost' ledovykh pereprav. *Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobil'no-dorozhnoi akademii*. 2009;1(11):32-36. (In Russ.)). Ссылка активна на: 30.11.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17892939>
 7. Бычковский Н.Н., Гурьянов Ю.А. Ледовые строительные площадки, дороги и переправы. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2005. – 180 с. [Bychkovskii NN, Guryanov YuA. Ledovye stroitel'nye ploshchadki, dorogi i perepravu. *Saratov: Saratov. gos. tekhn. un-t*; 2005. 180 p. (In Russ.)).
 8. Козин В.М., Жесткая В.Д., Погорелова А.В., и др. Прикладные задачи динамики ледяного покрова / Академия Естествознания. – М., 2008. – 329 с. [Kozin VM, Zhestkaya VD, Pogorelova AV, et al. *Prikladnye zadachi dinamiki ledyanogo pokrova* / Akademiya Estestvoznaniya. Moscow; 2008. 329 p. (In Russ.)). Ссылка активна на: 30.11.2023. Доступно по: <https://monographies.ru/en/book/view?id=14>
 9. Коренев Б.Г., Черниговская Е.И. Расчет плит на упругом основании (пособие для проектировщиков). – М.: ЦНИИСК, 1962. – 356 с. [Korenev BG, Chernigovskaya EI. *Raschet plit na uprugom osnovanii (posobie dlya proektirovshchikov)*. Moscow; 1962. 356 p. (In Russ.)).
 10. ГОСТ Р 58948-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Дороги автомобильные зимние и ледовые переправы. Технические правила устройства и содержания / Стандартиформ. – М. – 2020. – 52 с. [GOST R 58948-2020. *Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Dorogi avtomobil'nye zimnie i ledovye perepravu. Tekhnicheskie pravila ustroistva i sodержaniya* / Standartinform. Moscow; 2020. 52 p. (In Russ.)). Ссылка активна на: 28.11.2023. Доступно по: <https://docs.cntd.ru/document/1200174655?ysclid=lphxsee9y755018517>
 11. Козин В.М., Земляк В.Л. Физические основы разрушения ледяного покрова резонансным методом / ИМиМ ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре. – 2013. – 250 с. [Kozin VM, Zemlyak VL. *Fizicheskie osnovy razrusheniya ledyanogo pokrova rezonansnym metodom* / IMIM DVO RAN. Komsomol'sk-na-Amure; 2013. 250 p. (In Russ.)). Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22464123> Ссылка активна на: 30.11.2023.
 12. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – М., 2012. [SP 38.13330.2012. *Nagruzki i vozdeistviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov)*. Moscow; 2012. (In Russ.)). Ссылка активна на: 28.11.2023. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293793/4293793649.pdf?ysclid=lphwfi1fl1257364097>

Сведения об авторах:

Тряпицын Юрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN:8890-1721; ORCID: 0000-0003-0093-6557;
E-mail: Tryapitsinyv@mail.ru

Тряпкин Дмитрий Александрович, старший преподаватель;
eLibrary SPIN:8893-7828; ORCID: 0000-0001-6484-741X;
E-mail: Dmitry.tryapkin@yandex.ru

Information about the authors:

Yuri V. Tryapitsyn, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences, eLibrary
SPIN:8890-1721; ORCID: 0000-0003-0093-6557;
E-mail: Tryapitsynv@mail.ru

Dmitry A. Tryapkin, Assistant Professor;
eLibrary SPIN:8893-7828; ORCID: 0000-0001-6484-741X;
E-mail: Dmitry.tryapkin@yandex.ru

Цитировать:

Тряпицын Ю.В., Тряпкин Д.А. Совершенствование расчета ледовых переправ // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 86–93. doi: 10.17816/transsyst20239486-93

To cite this article:

Tryapitsyn YV, Tryapkin DA. Improvement of the calculation of ice crossings. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(4):86-93. doi: 10.17816/transsyst20239486-93

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 656.07

DOI 10.17816/transsyst20239494-107

© Н.А. Журавлева, А.Б. Никитин, Л.М. Чеченова

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
МАНЕВРОВОГО ОПЕРАТОРА ПОРТА НА ОСНОВЕ РОСТА
ИНВЕСТИЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Обоснование: в условиях новой геоэкономики деятельность компаний - маневровых операторов порта, становится важнейшим процессом формирующихся транспортно-логистических цепей поставок. Несмотря на санкционные ограничения экспорта-импорта значительной номенклатуры товаров, ограничений морских перевозок российским флотом, отсутствия страхования грузов и прочих негативных факторов, российские морские порты работают с максимальной загрузкой. Экономическая безопасность транспортно-логистической системы страны существенно определяется эффективностью и конкурентоспособностью деятельности портовых операторов. Аналитические данные по обрабатываемым товаропотокам за период с 2022 года по настоящее время и прогноз объемов грузов, которые будут предъявлены к перевозке в ближайшие несколько лет, свидетельствует о росте потребности мощностей, способных быстро и по оптимальной цене переваливать грузы в морских портах.

Цель: обеспечение экономической безопасности организации-маневрового оператора, осуществляющего доставку грузов в морские порты, на основе роста инвестиционного потенциала деятельности.

Методы: методология исследования построена на анализе деятельности АО «ПУЛ Транс» – организации, обеспечивающей эффективную маневровую работу в МП «Усть-Луга» и бесперебойную обработку грузопотока на стыке «Железная дорога – Порт – Море», с использованием основных положений методик рейтинга. Информационная база исследования опирается на отчеты и нормативно-правовую базу АО «ПУЛ Транс».

Результаты: определена система показателей факторов оценки инвестиционного потенциала с апробацией на примере деятельности АО «ПУЛ Транс», применен и апробирован рейтинговый метод в дополнение к оценке инвестиционного потенциала, установлены ключевые параметры оценки инвестиционного потенциала и их соответствие уровню экономической безопасности.

Заключение: исследование подтверждает, что изменение геоэкономики и геополитики расширило понимание экономической безопасности, дополнив его элементами обеспечения перевозок в условиях жесточайших санкционных ограничений, что является основой обеспечения инновационных решений по перевалке грузов, определяющих потенциал роста.

Ключевые слова: экономическая безопасность, инвестиционный потенциал, маневровый оператор, морской порт.

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© N.A. Zhuravleva, A.B. Nikitin, L.M. Chechenova

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)**ENSURING THE ECONOMIC SECURITY OF THE PORT SHUNTING
OPERATOR BASED ON THE GROWTH OF THE INVESTMENT
POTENTIAL OF THE ACTIVITY**

Background: in the conditions of the new geo-economy, the activity of companies - shunting operators of the port, becomes the most important process of the emerging transport and logistics supply chains. Despite the sanctions restrictions on the export and import of a significant range of goods, restrictions on sea transportation by the Russian fleet, lack of cargo insurance and other negative factors, Russian seaports are operating with maximum load. The economic security of the country's transport and logistics system is significantly determined by the efficiency and competitiveness of the activities of port operators. Analytical data on processed goods flows for the period from 2022 to the present and the forecast of the volumes of goods that will be announced for transportation in the next few years indicate an increase in the need for capacities capable of handling cargo in seaports quickly and at an optimal price.

Aim: to ensure the economic security of the shunting operator delivering cargo to seaports, based on the growth of the investment potential of the activity.

Methods: the methodology of the study is based on the analysis of the activities of JSC "POOL Trans" – an organization that provides effective maneuvering work in the MP «Ust-Luga» and uninterrupted handling of cargo traffic at the junction «Railway – Port – Sea», using the main provisions of the rating methods. The information base of the study is based on reports and the regulatory framework of JSC "POOL-Trans".

Results: a system of indicators of investment potential assessment factors was determined with testing on the example of the activities of JSC "POOL Trans", a rating method was applied and tested in addition to the assessment of investment potential, key parameters of investment potential assessment and their compliance with the level of economic security were established.

Conclusion: the study confirms that the change in geo-economics and geopolitics has expanded the understanding of economic security, supplementing it with elements of ensuring transportation under the most severe sanctions restrictions, which is the basis for providing innovative solutions for cargo transshipment that determine the growth potential.

Key words: economic security, investment potential, shunting operator, seaport.

ВВЕДЕНИЕ

Благоприятный инвестиционный климат, способствующий росту инвестиционной активности бизнеса и экономической безопасности, а также оценка инвестиционной привлекательности являются значимыми не только для инвесторов, но и для организаций с целью прогнозирования перспектив развития, эффективного управления инвестиционными потоками с учетом нестабильности экономики и ее отраслей.

Изменения цепей поставок в последние два года особенно сильно повлияли на деятельность морских портов и транспортных компаний, обеспечивающих поставки грузов к ним. Меняется номенклатура грузов, объемы перевозок и механизм управления ими. На первое место выходят проблемы соответствия показателей эффективности деятельности и обеспечения ее безопасности. Традиционно, под экономической безопасностью деятельности транспортной организации мы понимаем ее способность обеспечивать конкурентоспособную перевозку грузов по конкурентоспособной для данного вида товара цене на соответствующем товарном рынке, в срок, и минимальными затратами на оформление. Однако, изменение геоэкономики и геополитики расширило понимание экономической безопасности, дополнив его элементами обеспечения перевозок в условиях жесточайших санкционных ограничений (невозможность перевозок российскими судами, отсутствие страховок и пр.), что является основой обеспечения инновационных решений по перевалке грузов, определяющих потенциал роста (он же инвестиционный потенциал), и обуславливает актуальность данной работы [1].

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящего исследования является обеспечение экономической безопасности маневрового оператора, осуществляющего доставку грузов в морские порты, на основе роста инвестиционного потенциала деятельности.

Объект исследования – АО «Порт Усть-Луга транспортная компания» (АО «ПУЛ Транс») – организация, обеспечивающая эффективную маневровую работу в морском порту (МП) «Усть-Луга» и бесперебойную обработку грузопотока на стыке «Железная дорога – Порт – Море» [3].

Перечень оказываемых компанией услуг состоит из:

1. Основных:

- текущее содержание путей необщего пользования: текущее содержание подкрановых путей и инфраструктуры в зимний период, инструментальное обследование жд-пути;
- диспетчеризация - круглосуточный контроль и управление маневровой работой в порту;
- подача/уборка вагонов на терминалы порта и обратно собственным парком локомотивов.

2. Дополнительных:

- функции железнодорожного отправителя/получателя грузов в МП «Усть-Луга»;
- операторская деятельность на автомобильно-железнодорожном паромном комплексе (накат/ выкат вагонов). В настоящее время действует паромная линия по маршруту Усть-Луга (СПб) – Балтийск (Калининград) – Усть-Луга;

– услуги ПТОЛ - контроль обслуживания и ремонта локомотивов;
– аутсорсинг железнодорожного комплекса для терминалов порта - делегирование функций грузоотправителя/грузополучателя АО «ПУЛ Транс» позволит перегрузочному комплексу повысить оборачиваемость вагонов на терминале, улучшить экономические показатели деятельности, сэкономить затраты на содержание целого департамента.

3. Услуг по транспортной логистике – оказание комплекса экспедиторско-логистических услуг по принципу «единого окна»: внутрипортовое экспедирование, предоставление вагонов, оплата железнодорожного тарифа, подача/уборка вагонов, автомобильная доставка, таможенные услуги, организация проведения идентификации товаров Евразийского экономического союза (ЕАЭС), разработка оптимальных схем доставки грузов, разработка схем крепления грузов, изготовление и согласование чертежей и эскизов крепления, крепление грузов, формирование отправительских маршрутов, взвешивание, складская логистика, организация страхования грузов и сюрвейерских услуг.

Предметом исследования является рейтинговый метод оценки инвестиционного потенциала применительно к обеспечению экономической безопасности компаний в контексте следующих концептуальных подходов:

1. Связь с транспортными организациями, обеспечивающими доставку груза в порты. Бесперебойность обработки грузопотока обеспечена связью элементов (Рис.1).

2. Анализ внешней среды. АО «ПУЛ Транс» осуществляет обработку 100% грузопотока «МП «Усть-Луга», который, в свою очередь, является крупнейшим российским портом Северо-Запада с объемом в 124,1 млн. тонн переваленных грузов за 2022 г. и ростом в 135% по сравнению с 2021 г. – это наибольшие объемы по грузообороту в сравнении с другими морскими портами полигона ОЖД (Табл. 1).



Рис. 1. Взаимодействие элементов в процессе доставки грузов в морские порты [4]

Таблица 1. Уровень загрузки морских портов полигона ОЖД

Наименование морского порта	Припортовые ж/д станции полигона ОЖД	Структура грузооборота 2022 г., %	Уровень загрузки, 2022 г., %
Выборг	Выборг-эксп, Выборг	0,93	50,00
Высоцк	Высоцк-эксп, Высоцк	6,68	54,64
Санкт-	Новый Порт-эксп, Новый порт,	17,09	39,88

Наименование морского порта	Припортовые ж/д станции полигона ОЖД	Структура грузооборота 2022 г., %	Уровень загрузки, 2022 г., %
Петербург	Автово-эксп, Автово-перев, Автово		
Усть-Луга	Лужская-эксп, Лужская	61,28	74,33
Мурманск	Мурманск-эксп, Мурманск-перев, Мурманск	12,75	62,42
Кандалакша	Кандалакша-эксп, Кандалакша- перев,	1,27	55,88

Источник: составлено авторами по данным ОЖД

Несмотря на последствия санкционных ограничений, изменения в номенклатуре и структуре экспорта/импорта товаров, появления новых маршрутов перевозки и прочих дестабилизирующих факторов, динамика показателей нагрузки на жд-станции МП «Усть-Луга» является положительной (Табл. 2), что позволяет установить пороговые значения для последующей оценки эффективности обеспечения экономической безопасности маневрового оператора, осуществляющего доставку грузов в морские порты.

Таблица 2. Пороговое значение показателей нагрузки на припортовые жд-станции полигона ОЖД с долей в общем объеме перевозок (в порядке убывания степени нагрузки в 2022 году), %

Ж/д станции полигона ОЖД	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Лужская-эксп	43,0%	45,7%	48,1%	51,7%	54,4%
Мурманск-эксп	15,0%	14,8%	14,3%	12,6%	12,3%
Автово-эксп	15,1%	14,3%	14,5%	13,5%	8,8%
Высоцк-эксп	10,5%	9,9%	8,9%	7,1%	6,6%
Лужская	4,9%	4,6%	4,9%	4,6%	6,2%
Новый Порт-эксп	5,3%	5,0%	5,6%	6,3%	5,9%
Автово	0,8%	0,7%	0,7%	0,9%	1,9%
Кандалакша-эксп	1,5%	1,6%	0,5%	0,5%	1,0%

Источник: анализ авторов по данным ОЖД

Кроме того, проводится анализ основных грузоотправителей и грузополучателей, осуществляющих погрузку/выгрузку грузов на/с полигона ОЖД в МП «Усть-Луга». В состав крупнейших включены компании с указанием объемов грузооборота за 2022 г.:

АО «Усть-Луга Ойл» - 22,6 млн. тонн,

АО «Ростерминалуголь» - 21,6 млн. тонн,

ООО «Ультрамар» - 13,5 млн. тонн.

Высокий потенциал роста инвестиционного потенциала обоснован данными по темпам роста объемов грузооборота (2022/2021 гг.) стивидоров морского порта, что также свидетельствует об эффективности обеспечения

экономической безопасности маневрового оператора, осуществляющего доставку грузов в МП «Усть-Луга».

АО «Усть-Луга Ойл»: 104 %,

ООО «Ультрамар»: 102,5 %

ООО «Европейский серный терминал»: 110 %,

ООО «Портэнерго»: 132,5 %,

АО «Усть-Лужский контейнерный терминал»: 106 %,

Усть-Лужское управление Северо-Западного бассейнового филиала ФГУП «Росморпорт»: 167 %.

3. Анализ внутренней среды предполагает оценку основных производственно-финансовых, организационно-управленческих и технико-технологических показателей с целью выявления потенциала роста. Кроме того, в основу оценки положен анализ показателей, характеризующих объемы и структуру грузов, перевалка которых осуществляется через припортовые ж/д станции ОЖД, как ключевых в обеспечении экономической безопасности.

Основными видами грузов являются каменный уголь, нефть и нефтепродукты, химические и минеральные удобрения, руда железная и марганцевая (Табл. 3), в совокупности они составляют больше 87 % от объемов перевалки через припортовые станции за рассматриваемый период и порядка 90 % от соответствующих объемов в 2022 г.

Все вышеназванные грузы относятся к основным и по результатам анализа объемов перевозок в целом по региональной транспортно-логистической цепи.

Таблица 3. Доля от объемов грузоперевозок по жд-станциям МП «Усть-Луга»

Основные виды грузов	Доля от объемов грузоперевозок в 2022 г. полигона ОЖД по станциям МП Усть-Луга, %	
	Отправление - погрузка	Поступление - выгрузка
Нефть и нефтепродукты	—	Лужская-эксп – 50,0 % Лужская – 14 %
Каменный уголь	Лужская-эксп – 30,8 %	Лужская-эксп – 60,4 %
Химические и минеральные удобрения	—	Лужская-эксп – 20,4 %
Руда железная и марганцевая	—	Лужская-эксп – 10,7 %
Строительные грузы	—	Лужская – 5,3 %

Источник: анализ авторов по данным ОЖД

Контейнерные перевозки преобладают в перевозке таких видов грузов как бумага, метизы (доля контейнерных перевозок в данных видах превышает 90 %), лесные грузы (доля превышает 70 %), прочие грузы и цветные металлы (доля превышает 40 %). Контейнерными перевозками не осуществляется перевозка каменного угля и кокса, практически не

осуществляется нефти и нефтепродуктов, руды железной и марганцевой (менее 1 %), соответствующая доля мала у перевозок химических и минеральных удобрений и сахара (1–5 %) (Табл. 4).

Таблица 4. Темпы роста перевалки грузов в разрезе жд-станций порта «Усть-Луга», %

Показатель	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Лужская-эксп	100 %	110,28 %	116,83 %	131,82 %	132,31 %
в т.ч. контейнерами	100 %	98,31 %	90,07 %	65,55 %	21,88 %
доля контейнерных перевозок	0,8 %	0,7 %	0,6 %	0,4 %	0,1 %
Лужская	100 %	97,53 %	104,17 %	102,59 %	130,93 %
в т.ч. контейнерами	100 %	4,53 %	41,11 %	102,00 %	3274,74 %
доля контейнерных перевозок	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,4 %

Источник: анализ авторов по данным ОЖД

4. Оценка конкурентоспособности транспортной организации для оценки эффективности деятельности стивидорной компании.

5. Формирование целостной картины рисков для оценки инвестиционного потенциала.

Методы сбора информации и проведения анализа: количественные методы, контент-анализ информационных источников, сбор и анализ вторичной информации, статистические методы обработки информации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Определена система показателей факторов оценки инвестиционного потенциала с апробацией на примере деятельности АО «ПУЛ Транс»

В процессе диагностики направлений и результатов деятельности установлены инвестиционные преимущества АО «ПУЛ Транс», учитывающие результативную деятельность на протяжении 15 лет:

- наличие внушительной клиентской базы с постоянно растущим спросом;
- достижение ЦУР в части социальных и экологических эффектов;
- позицию лидера по обработке грузопотока в МП «Усть-Луга»;
- положительную динамику показателей доходности;
- значение показателей ликвидности на уровне выше среднеотраслевых (Табл. 5).

Таблица 5. Система данных оценки инвестиционного потенциала АО «ПУЛ Транс»

Оцениваемый фактор	Показатели оценки	Характеристика/обоснование преимущественного фактора
Стабильность положения	Срок доходной работы, лет Темпы роста объемов грузооборота, %	2007 – создание организации; 2008–2015 – поступательное расширение спектра оказываемых услуг; 2022 – 15 лет успешной работы по обеспечению бесперебойной обработки грузопотока на стыке «Дорога – Порт – Море».
Позиция лидера	Доля обработки грузопотока в МП, % Доля загрузки в сравнении с МП, %	обработка 100 % грузопотока в МП «Усть-Луга», обеспечивающего перевозку грузов по МТК «Север-Юг», «Запад-Восток».
Обеспеченность клиентской базой	Структура клиентской базы, % Темпы роста по объему и структуре перевозимых грузов в разрезе клиентов организации, %	структура клиентской базы представлена исключительно активным сегментом клиентов с долей присутствия в %: АО «Усть-Луга Ойл» – 37,5 %, АО «Ростерминалуголь» – 27,83 %, ООО «Ультрамар» – 17,67 %, ООО «Нефтехимическая транспортная компания» – 6,36 %, ООО «Универсальный перегрузочный комплекс» – 5,09 %, ОАО «Усть-Лужский Контейнерный Терминал» – 2,7 %, ФГУП «Росморпорт» – 1,33 %, Универсальный торговый терминал «Усть-Луга» – 0,78 %, ООО «Европейский серный терминал» – 0,74 %.
Согласованность развития с ЦУР	Темпы роста по количеству корпоративных мероприятий, % Темпы роста по строительству и электрификации объектов инфраструктуры, % Коэффициент результативности управления и управленческих затрат	– социальная привлекательность: формирование корпоративной культуры и ценностей, путём проведения корпоративных мероприятий, а также создания и поддержания корпоративных традиций; – экологическая привлекательность: строительство очистных сооружений, полная электрификация путей, сертификация «Система экологического менеджмента ISO 14001»; – эффективность управления: более 15 лет успешной работы в отрасли, доля ОАО «РЖД» в уставном капитале организации – 50 %.
Положительная динамика показателей доходности и ликвидности	Темпы прироста чистой прибыли, % Коэффициенты общей, срочной и абсолютной ликвидности	за период с 2020–2022 гг. темпы прироста чистой прибыли – 68,91 % (Рис. 2); в 2022 г. коэффициенты общей, срочной и абсолютной ликвидности находятся на уровне предельно допустимых значений (Рис. 3).

Источник: составлено автором по данным [3, 5]

Детализация значений прироста чистой прибыли и коэффициентов ликвидности по годам представлена на Рис. 2, 3.

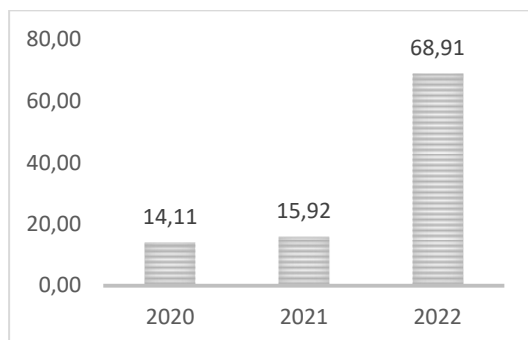


Рис. 2. Темпы прироста чистой прибыли, %



Рис. 3. Динамика значений коэффициентов ликвидности

Источник: составлено автором по данным [3]

2. Применен и апробирован рейтинговый метод в дополнение к оценке инвестиционного потенциала

Данный подход интересен тем, что он рассматривает инвестиционный потенциал через совокупность определения финансового состояния по уровню риска, путем представления показателей в 4-х балльной системе и присвоения каждому показателю весового коэффициента. Количественный анализ рисков предполагает оценку рисков и характеризующих их коэффициентов (Табл. 6).

Таблица 6. Результат расчета финансовых коэффициентов

Коэффициент	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Риск неликвидности активов - коэффициенты ликвидности			
Коэффициент абсолютной ликвидности (К1)	1,18	0,96	1,30
Коэффициент срочной ликвидности (К2)	1,58	1,36	1,52
Коэффициент текущей ликвидности (К3)	1,63	1,42	1,54
Риск снижения финансовой устойчивости общества - коэффициенты финансовой устойчивости			
Коэффициент финансовой независимости (К4)	0,53	0,53	0,51
Риск низкой рентабельности деятельности - коэффициенты рентабельности			
Рентабельность продаж (К5)	26,95	27,18	28,34
Рентабельность собственного капитала (К6)	41,25	45,63	58,23
Рентабельность активов (К7)	21,51	24,04	29,81
Риск снижения деловой активности общества - коэффициенты деловой активности			
Соотношение дебиторской и кредиторской задолженности (К8)	0,45	0,64	0,29
Соотношение оборачиваемости дебиторской и кредиторской задолженности (К9)	2,09	2,65	3,13
Прочие коэффициенты			
Соотношение роста прибыли до вычета расходов по процентам, уплаты налогов и амортизации (EBITDA) к росту выручки (К 10)	1,17	1,03	1,66

Источник: составлено автором по данным [3]

На основе сравнения рассчитанных значений коэффициентов с нормативными по каждому коэффициенту определяются группа и балл. Далее на основании определенных баллов для каждого коэффициента с учетом весов, предварительно установленных коэффициентам, рассчитывается общая сумма баллов (Табл. 7).

Таблица 7. Порядок расчет общей суммы баллов методом рейтинга (R)

Коэффициент	Значение	Балл, К	Вес, W	R = К*W
Коэффициент абсолютной ликвидности (K1)				
2020	1,18	4	0,25	1
2021	0,96	4		1
2022	1,30	4		1
Коэффициент срочной ликвидности (K2)				
2020	1,58	4	0,5	2
2021	1,36	4		2
2022	1,52	4		2
Коэффициент текущей ликвидности (K3)				
2020	1,63	3	0,5	1,5
2021	1,42	3		1,5
2022	1,54	3		1,5
Коэффициент финансовой независимости (K4)				
2020	0,53	2	0,75	1,5
2021	0,53	2		1,5
2022	0,51	2		1,5
Рентабельность продаж (K5)				
2020	26,95	4	0,25	1
2021	27,18	4		1
2022	28,34	4		1
Рентабельность собственного капитала (K6)				
2020	41,25	4	0,5	2
2021	45,63	4		2
2022	58,23	4		2
Рентабельность активов (K7)				
2020	21,51	4	0,5	2
2021	24,04	4		2
2022	29,81	4		2
Соотношение дебиторской и кредиторской задолженности (K8)				
2020	0,45	1	0,25	0,25
2021	0,64	1		0,25
2022	0,29	1		0,25
Соотношение оборачиваемости дебиторской и кредиторской задолженности (K9)				
2020	2,09	1	0,25	0,25
2021	2,65	1		0,25
2022	3,13	1		0,25
Соотношение роста прибыли до вычета расходов по процентам, уплаты налогов и амортизации (EBITDA) к росту выручки (K 10)				
2020	1,17	4	0,25	1
2021	1,03	4		1
2022	1,66	4		1

Источник: составлено автором по данным [3]

Подводя итог, отметим следующее:

- финансовое состояние организации – удовлетворительное и имеет перспективы стабильного развития, что обосновано неизменным значением общего балла по рейтингу на протяжении 3 лет – 12,50, что входит в диапазон группы с удовлетворительным финансовым состоянием;
- наибольшая доля активов представлена оборотными активами (60 %) за счет преобладания денежных средств; в постоянных активах более 70 %, имеют основные средства;
- способность погашения краткосрочных обязательств за счет денежных средств и дебиторской задолженности подтверждается значением коэффициента срочной ликвидности на уровне 1,52. Кроме того, значение коэффициента абсолютной ликвидности на уровне 1,3 свидетельствует о платежеспособности организации;
- высокий уровень финансовой устойчивости обеспечен долей собственного капитала в общей сумме пассивов на уровне 51 % по итогам 2022 г.

3. Установлены ключевые параметры оценки инвестиционного потенциала и их соответствие уровню экономической безопасности

Инвестиционный потенциал стивидорной компании представляет собой совокупность финансовых, производственных, ресурсных, инфраструктурных, кадровых, инновационных элементов, на которые оказывает влияние внутренняя и внешняя среда, что наглядно отображено на Рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных условиях геополитической и экономической дестабилизации транспортный организации как никогда заинтересованы в повышении эффективности деятельности, конкурентоспособности, рентабельности и стабильном финансовом состоянии, как на данный момент, так и в долгосрочной перспективе по причине того, что от данных результатов зависит продуктивность организации, по которым впоследствии она будет оцениваться инвесторами с целью дальнейшего финансирования [7]. Совокупность показателей, необходимых для оценки инвестиционной привлекательности организации, обусловлена многими требованиями: суммой инвестиций, характером деятельности организации, а также его коммерческой и кредитной репутацией. Имея высокий уровень финансовой устойчивости и стабильный рост показателей рентабельности, транспортная организация ставит перед собой такие приоритетные задачи, как рост чистых активов, расширение полигонов присутствия, обновление эксплуатационного парка, развитие транспортной инфраструктуры и пр.



Источник: составлено авторами по данным [3] за 2021/2022 гг.

Рис. 4. Ключевые параметры инвестиционного потенциала, соответствующие уровню экономической безопасности

Авторы заявляют, что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Марченко Н.С., Конвисарова Е.В. Особенности диагностики уровня экономической безопасности морских портов // Азимут научных исследований: экономика и управление. – 2018. – Т.7. – №2(23). – С. 229–233. [Marchenko NS, Konvisarova EV. Osobennosti diagnostiki urovnya e`konomicheskoy bezopasnosti morskikh portov. Azimut nauchny`x issledovaniy: e`konomika i upravlenie. 2018;7(2):229-233. (In Russ.)]. Ссылка активна на 21.11.2023. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-diagnostiki-urovnya-ekonomicheskoy-bezopasnosti-morskih-portov>
2. Никитин А.В. Оценка эффективности маневрового оператора морского порта и железнодорожного узла // Материалы XVI МНПК: Логистика: современные тенденции развития (6-7 апреля 2017 г., Санкт-Петербург). – СПб:Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. – 2017. – С. 170-174. [Nikitin AV. Ocenka e`ffektivnosti manevrovogo operatora morskogo porta i zheleznodorozhnogo uzla. Materialy` XVI MNPK: Logistika: sovremennyye tendencii razvitiya (6-7 aprelya 2017 g., St.

- Peterburg). 2017;170-174. (In Russ.)). Ссылка активна на 21.11.2023. Доступно по: https://www.hse.ru/data/2020/02/11/1572958752/Сборник_ЛСТР2017_1.pdf
3. Официальный портал АО «Пул Транс». [Oficial`ny` portal АО «Pul Trans». [Internet]. (In Russ.)). Ссылка активна на 21.11.2023. Доступно по: <https://pultrans.ru/?ysclid=lp9wkjohic461293611>
 4. Лахметкина Н., Щелкунова И., Фомичева О. Логистические взаимодействия в системе «станция-морской порт» // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – №2. – С 178–187. [Laxmetkina N, Shhelkunova I, Fomicheva O. Logistics interaction within the system of rail station and sea port. *The world of transport*. 2018;16(2):178-187. (In Russ.)). Ссылка активна на 21.11.2023. Доступно по: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/1445>
 5. Доклад руководителя АО «Пул Транс» Евстафьева И.Ю. [Doklad rukovoditelya АО «Pul Trans» Evstaf`eva I.Yu.. [Internet]. (In Russ.)). Ссылка активна на 21.11.2023. Доступно по: <https://morproekt.ru/attachments/article/582/random-161013133639.pdf?ysclid=lp9wta08jk961878203>
 6. Гулый И.М. Интеллектуальный помощник маневрового диспетчера – цифровое решение в области использования искусственного интеллекта на железнодорожном транспорте // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. – 2022. – № 11. – С. 428–431. [Gulyi IM. The intelligent assistant of the shunting dispatcher is a digital solution for the use of artificial intelligence in railway transport. *Competitiveness in the global world: economics, science, technology*. 2022;11:428-431. (In Russ.)). Доступно по: https://lib.rgups.ru/site/assets/files/5433/iskustvennyi_intellekt.docx Ссылка активна на 21.11.2023.
 7. Гулый И.М. Тенденции посткризисного восстановления портов балтийского бассейна // Экономика устойчивого развития. – 2023. – № 3(55). – С. 22–27. [Gulyi IM. Trends in post-crisis recovery of baltic basin ports. *Sustainable development economics*. 2023;3(55):22-27. (In Russ.)). Ссылка активна на 21.11.2023. Доступно по: http://www.economdevelopment.ru/ru_archive/issue55/

Сведения об авторах:

Журавлева Наталья Александровна, д.э.н., профессор;

eLibrary SPIN: 8599-5636; ORCID: 0000-0003-3566-9225; Scopus ID: 56583893700

E-mail: zhuravleva_na@mail.ru

Никитин Александр Борисович, д.т.н., профессор;

eLibrary SPIN: 5800-2656; ORCID: 0000-0002-9948-9867; Scopus ID: 57190230129

E-mail: nikitin@crtc.spb.ru

Чеченова Лиана Мухамедовна, д.э.н., профессор;

eLibrary SPIN: 7593-2214; ORCID: 0000-0002-2641-9454; Scopus ID: 57553177000

E-mail: liana1981-149@mail.ru

Information about the author:

Natalya A. Zhuravleva, Doctor of Economics;

eLibrary SPIN: 8599-5636; ORCID: 0000-0003-3566-9225; Scopus ID: 56583893700

E-mail: zhuravleva_na@mail.ru

Aleksandr B. Nikitin, Doctor of Technical Sciences;

eLibrary SPIN: 5800-2656; ORCID: 0000-0002-9948-9867; Scopus ID: 57190230129

E-mail: nikitin@crtc.spb.ru

Liana M. Chechenova, Doctor of Economics;
eLibrary SPIN: 7593-2214; ORCID: 0000-0002-2641-9454; Scopus ID: 57553177000
E-mail: liana1981-149@mail.ru

Цитировать:

Журавлева Н.А., Никитин А.Б., Чеченова Л.М. Обеспечение экономической безопасности маневрового оператора порта на основе роста инвестиционного потенциала деятельности // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 94–107. doi: 10.17816/transsyst20239494-107

To cite this article:

Zhuravleva NA, Nikitin AB, Chechenova LM. Ensuring the economic security of the port shunting operator based on the growth of the investment potential of the activity. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(4): 94-107. doi: 10.17816/transsyst20239494-107

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

DOI 10.17816/transsyst202392108-116

© **L.F. Kazanskaya, N.V. Batalova**

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

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE DEVELOPMENT OF HIGH-SPEED GROUND TRANSPORT

Aim: is a comparative analysis of the technical and economic characteristics of various types of land rail transport.

Methods: comparative analysis, structuring of high-speed traffic processes, logical analysis of the cause-and-effect organization of the high-speed highways, made it possible to formalize the technical advantages of maglev transport technology in comparison with the construction of high-speed highways.

Results: A key trend has been identified to increase traffic speeds, requiring the convergence of various transport systems. The main criteria for innovative high-speed ground transport systems are classified. It is substantiated that increasing the level of technical characteristics of innovative technologies in the development of high-speed ground transport will allow maglev transport to become a key link in multimodal transport corridors. A comparison of the technical and economic characteristics of various types of land railway transport confirms that the introduction of MLTT into the transport complex will be able to significantly influence the matrix of the transport industry and accumulate both the passenger flow of air and rail traffic, as well as part of the containerized cargo, and become a key link in the multimodal transport corridors of the Russian Federation.

Conclusion: The conclusions are based on a representative sample of data on the innovative, technological and economic parameters of two high-speed rail construction technologies: wheel-rail and magnetic levitation.

Key words: high-speed highways, magnetic levitation, convergence.

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 338.47

© **Л.Ф. Казанская, Н.В. Баталова**

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

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАЗВИТИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА

Цель: сравнительный анализ технико-экономических характеристик различных видов наземного рельсового транспорта.

Методы: сравнительный анализ, структурирование процессов высокоскоростного движения, логический анализ причинно-следственной организации высокоскоростных магистралей, позволили формализовать технические преимущества технологии маглев-транспорта по сравнению со строительством высокоскоростных магистралей.

Результаты: выявлена ключевая тенденция увеличения скоростей движения, требующая конвергенции различных транспортных систем. Классифицированы основные критерии инновационных систем высокоскоростного наземного транспорта. Обосновано, что повышение уровня технических характеристик инновационных технологий при развитии высокоскоростного наземного транспорта позволит маглев-транспорту стать ключевым звеном в мультимодальных транспортных коридорах. Сравнение технико-экономических характеристик различных видов наземного железнодорожного транспорта подтверждает, что внедрение МЛТТ в транспортный комплекс сможет существенно повлиять на матрицу транспортной отрасли и аккумулировать как пассажиропоток воздушного и железнодорожного сообщения, так и часть контейнерных грузов, и стать ключевым звеном мультимодальных транспортных коридоров Российской Федерации.

Заключение: сделано на основе репрезентативной выборки данных об инновационных, технологических и экономических параметрах двух технологий строительства высокоскоростных железных дорог: колесно-рельсовой и магнитно-левитационной.

Ключевые слова: высокоскоростные магистрали, магнитная левитация, конвергенция.

INTRODUCTION

The 21st century for the Russian Federation is the time of realizing the country's territorial potential through the commissioning of transport infrastructure, the peak capacity of which has today reached its maximum with existing production capacities. A further increase in route speeds will depend on the design features of the processes dictated by the design features of railway transport. This trend applies to both the freight and passenger transportation sectors. To solve this problem, new transport technologies are required. And in the first place in these technologies there should be convergence, that is, the unification of railway, road, aviation and other transport systems on one basis, "borrowing" the advantages of one type of transport into the development of technologies and technical solutions of others. Scientists and practitioners of the transport industries in many countries around the world have come to the conclusion that the concept of transport of the future is generally based on the idea of convergence of several modes of transport.

MATERIALS AND METHODS

The construction of high-speed transport lines is the main driver in the development of high-speed ground transport trends. At the same time, the key

fact in the field of construction of extended transport networks is that the profit received by the carrier from the direct provision of transport services is significantly less than the income received by the state due to the growth of the tax base and business activity of the population in these regions [1-3]. A striking example of this is the doubling of real estate and land prices in regions of France integrated by high-speed highway corridors (HSR) into a single transport system.

However, the creation of a comprehensive integrated transport network in Russia is a task that cannot be solved only by already tested and implemented technologies, primarily based on the “wheel-rail” principle.

Traditional rail transport has exhausted its development potential at 350 km/h, mainly for the following reasons:

- losses due to the action of dissipative friction forces caused by the “wheel-rail” joint;
- technical features of current collector. Current collectors are subject to exponential wear at speeds above 400 km/h;
- increased wear and tear of the infrastructure, which necessitates the use of damping mats and frequent repairs;
- increased wear of overpasses, in which, due to the large distance between the wheel pairs, a large value of the dynamic coefficient is observed, calculated according to Eurocode methods [4] (a hypothetical increase in speeds to 500 km/h will lead to the appearance of resonant peaks that are multiples of the resonant frequency, requiring a significant increase in strength and material consumption of structures).

This work uses such research methods as comparative analysis, structuring of high-speed traffic processes, logical analysis of the cause-and-effect organization of high-speed lines, which made it possible to formalize the technical advantages of maglev transport technology in comparison with the construction of high-speed highways.

RESULTS

Russia has a much larger territory than Japan, South Korea, Germany, and France, where the integration of high-speed lines into the transport complex has successfully completed its tasks. In Russia, the average distance between key socio-economic centers is 190 km in the European part and 320 km beyond the Urals. In the above countries, the same is usually the length of the entire HSR line, on the basis of which we can conclude that the speeds that the HSR can provide (350 km/h) will have a significantly smaller consolidating effect in the conditions of socio-economic centers dispersed throughout Russia. This fact is confirmed by the experience of the People's Republic of China, where the high-speed railway can with great difficulty provide a comfortable trip duration (2.5-4

hours) between the main economic centers Beijing - Shanghai (1318 km - trip duration 4.48 hours)[5].

It is generally accepted that high-speed railway lines cannot ensure the transportation of goods. Therefore, the decision to build a high-speed highway is made solely on the basis of the parameters of existing and projected passenger flows in this direction. Today, the estimate of the profitable HSR passenger flow is from 7 to 14 million passengers per year [6]. This leads to the a priori impossibility of constructing HSR lines in all directions in Russia, except Moscow-St. Petersburg. The main disadvantages of high-speed rail construction in Russia are presented in Fig. 1.

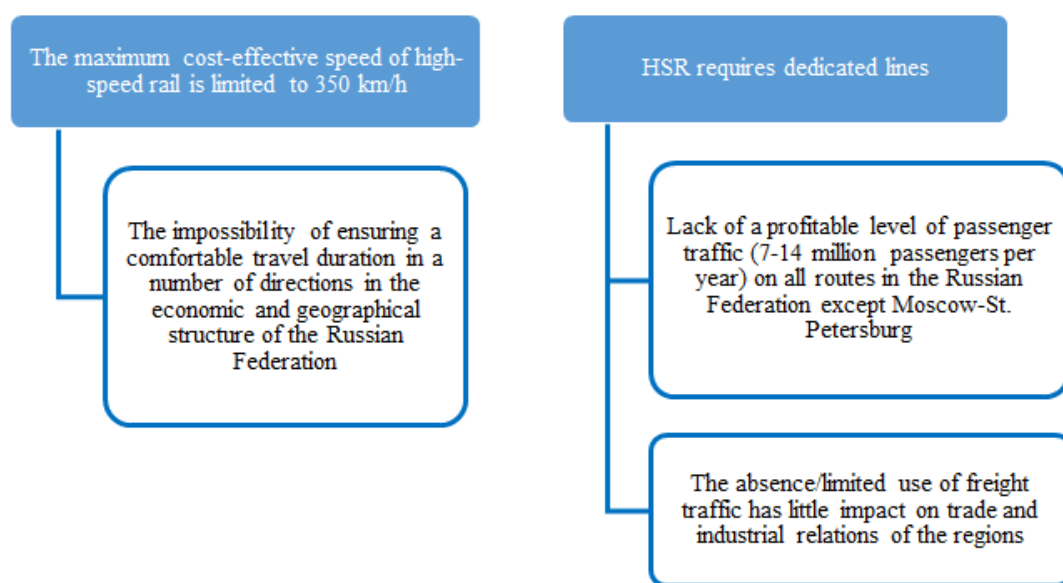


Fig. 1. The main disadvantages of high-speed rail construction in the conditions of the Russian Federation

The line designs of most high-speed lines provide for the possibility of moving freight trains with a C8 load at normal speed, which will entail corresponding logistical difficulties in coordinating schedules.

It is obvious that the search for solutions to improve transport accessibility and carrying capacity in Russia lies in the field of innovative solutions. Our colleagues have defined the concept of innovative high-speed ground transport systems (HSGTS) as systems that meet the following criteria [7]:

1. Cost-effective transportation speed is 600 km/h, which makes it possible to compete with air transport in almost all directions of the continental part of Russia (transportation lengths up to 5000 km).

2. A significant change in the current matrix of the transport industry with the introduction of HSGTS into the transport complex due to the dragging of passenger traffic and cargo traffic.

To date, there are various HSGTS concepts (magnetic levitation transport;

vacu-um train; hovercraft trains; trains using screen effect), the unifying parameters of which are the absence of direct contact between the train and the guide track, as well as significant potential over traditional technology based on contact "wheel-rail", which provides the following advantages:

- reduced wear and tear of infrastructure;
- increasing the cost-effective speed range;
- great potential for reducing energy consumption.

The most proven technology, with functioning prototypes and commercial lines, is maglev transport technology (MLTT), which has objectively historically surpassed other subtypes according to a number of criteria [8]:

- testing;
- possibility of precise control;
- line scalability;
- prospects due to the emergence of high-temperature superconductors.

At the same time, the experience of constructing pilot routes has shown that, de-spite the innovativeness of maglev equipment, the main cost item is the construction of transport infrastructure (spans and overpasses), which amounts to 60-80 % of the total project budget [9]. Research conducted by employees of the "Bridges" department of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University revealed the key features of the interaction of maglev transport together with overpass structures [10].

Calculations verified in two software packages Midas Civil and Sofistik showed significant differences in the load transfer of maglev transport from the traditional wheel-rail technology. The nature of the differences is as follows: due to the significantly smaller characteristic distance between individual suspension magnets in MLTT than between pairs of wheels in wheel-rail systems (0.258 m and 16-22 m, respectively), a smoother response of the span is achieved when the train moves along it resonant speeds. A clear example of this is the comparative graphs of the movement of the middle of the span when a maglev train and a Thalys high-speed train pass through it (Fig. 2, 3).

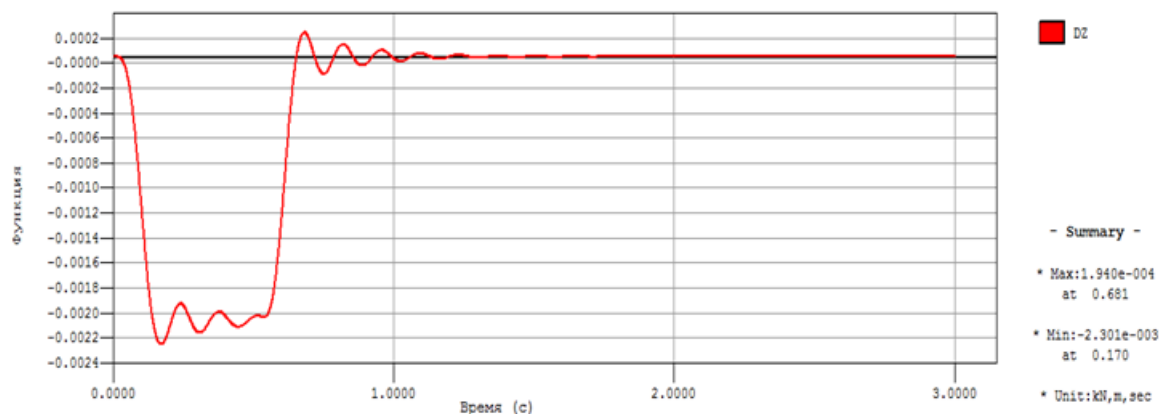


Fig. 2. Movements of the center of the superstructure during the passage of the Transrapid maglev train at a speed of 500 km/h [10]

Due to these differences, beam span structures for maglev transport can combine the following advantages:

- less weight;
- the ability to handle heavier loads, including freight trains;
- high efficiency of material use;
- reduction of operating costs.

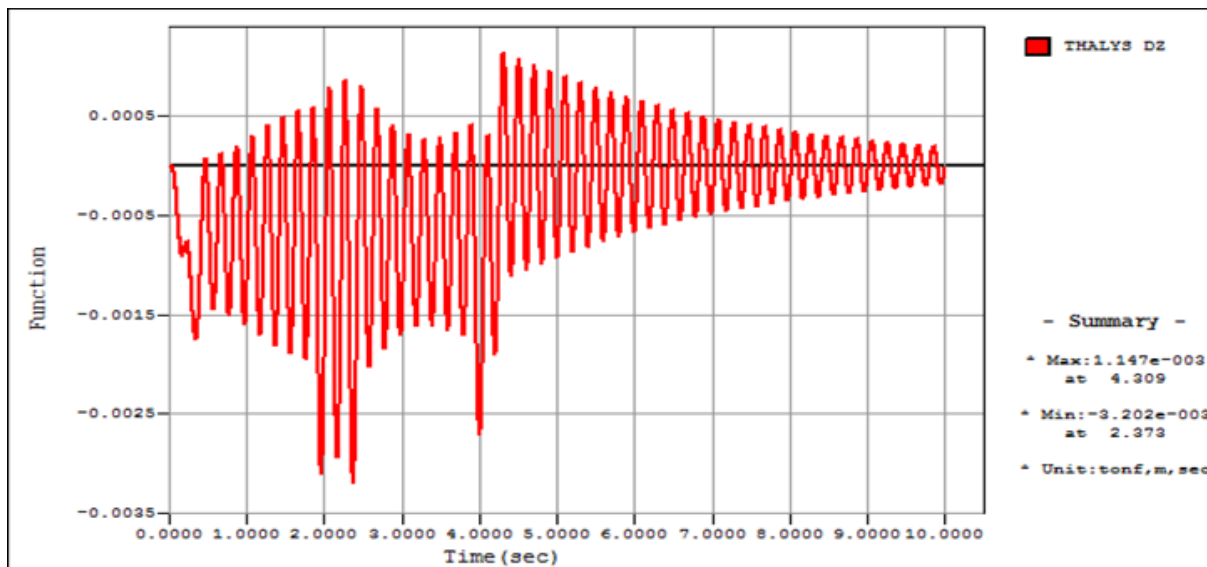


Fig. 3. Movements of the center of the superstructure during the passage of a Thalys train at a speed of 350 km/h [10]

In the context of the construction of large-scale developed high-speed transport networks, the use of MLTT will have a positive multiplier effect by reducing costs at all stages of construction. In addition, the introduction of MLTT into the transport complex will be able to significantly influence the matrix of the transport industry and accumulate both the passenger flow of air and rail traffic, as well as part of the containerized cargo, and become a key link in the multimodal transport corridors of the Russian Federation.

A comparative analysis of the main time parameters of a trip on the Moscow-St. Petersburg direction between the high-speed modes of transport existing today and the maglev line is presented in Fig. 4. Due to a higher level of speeds, carrying capacity and, as a result, a unique trade offer, the maglev line between St. Petersburg and Moscow can capture the entire total passenger flow, which is currently accumulated by aviation and railway traffic (9.3 million people).

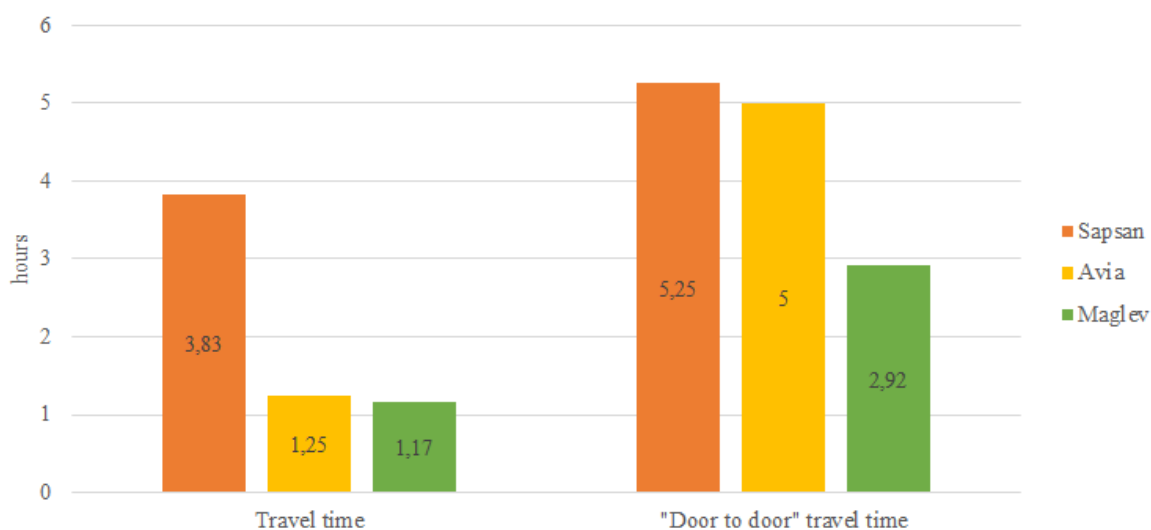


Fig. 4. Comparison of the main time parameters of a trip on the Moscow - St. Petersburg direction by high-speed modes of transport

A comparative analysis of technical characteristics between HSR and HSGTS is shown in Table.

Table. Specifications of HSR and HSGTS

Specifications	HSR	HSGTS
Representatives	TVG, ICE, KTX etc.	Vacuum Maglev
Maximum cost-effective speeds, km/h	350	600/1000*
Effective range, km	1400	5000 and more
Possibility of cargo transportation	No freight/limited traffic at speeds up to 140 km/h	Possibility of cargo transportation without speed limits

*in the traditional version on a trestle/in a pipe with low pressure (technical vacuum)

It is worth noting that the economic description of such projects can be viewed from different angles, since transport systems, unlike other sectors of the economy, are not capable of quickly responding to changes, for example, a change in techno-logical structure [11, 12].

CONCLUSION

Changes in the scientific and technical sphere of recent decades have significantly influenced new trends in the development of the transport sector. MLLT is a product of the convergence of various transport systems, which is actively involved in the transformation of the world economy, and the creation of systems that meet the criteria of HSGTS will contribute to a significant improvement in transport accessibility of the regions of the Russian Federation

and eliminate the shortcomings of traditional high-speed rail "wheel-rail" systems within the framework of the economic and geographical location of Russian Federation [13, 14].

References

1. Integrated transport system. Center for Strategic Development. Available on: <https://www.csr.ru/upload/iblock/9f5/9f59e8789c4af88f7a67ce69c17d288e.pdf> [cited 2023 Sep 20]. (In Russ).
2. Kazanskaya L. Development of high-speed rail transport as a factor in increasing the competitiveness of the country's national economy. *Economics and management in the 21st century: current issues, achievements and innovations*. Penza; 2017. pp. 55-63. (In Russ.). The link is active on: 28.09.2023. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=yhsfgz>
3. Misharin A. Aspects of creating an integrated network of high-speed and high-speed communication in the Russian Federation. *Transport of the Russian Federation*. 2014;2(51):9-13. (In Russ.). The link is active on: 28.09.2023. Available from: <https://e-library.gumrf.ru/cgi>
4. Special technical conditions. Artificial structures on the site Moscow-Kazan high-speed railway Moscow-Kazan-Yekaterinburg. Technical standards and requirements for design and construction. (In Russ.). [cited 2023 Sep 20] Available from: <https://www.rzd.ru/api/media/resources/c/1/121/72402?action=download>
5. China in the fast lane: bullet train and maglev. [Internet]. [cited 2023 Sep 20]. Available on: <https://asiatimes.com/2018/08/china-in-the-fast-lane-bullet-trains-and-maglev-lines/>
6. Igolkin G. Prospects for the use of control automation systems in magnetic levitation transport technology. *Technologies for constructing cognitive transport systems*. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. May 30-31, 2018. St. Petersburg: IPT RAS, 2018, 278 p. (In Russ.). The link is active on: 28.09.2023. Available from: https://www.iptran.ru/images/pdf/Cognitive_transport_systems_2018.pdf?ysclid=lpujn8xgxa276168836
7. Igolkin G, Pegin P. Formation of the concept of innovation systems high-speed ground transport. *Bulletin of Civil Engineers*. 2018;4(69):181-189. (In Russ.). doi: 10.23968/1999-5571-2018-15-4-181-188
8. Lapidus B. Magnetic levitation is the fundamental basis for super high-speed vacuum-levitation technologies. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(3):26-35. doi: 10.17816/transsyst29184326-35
9. Walraven JC, Romeijn A, Hoogenboom CJ. Dynamic Simulation of the Maglev Guideway Design. *Delft University of Technology*. 2008:145. The link is active on: 28.09.2023. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/245281868>
10. Igolkin G, Dyachenko L, Smirnov V, Pegin P. Peculiarities dynamic interaction of magnetic levitation high-speed transport and bridge structures. *Bulletin of scientific research results*. 2018;1:111-118. (In Russ.). The link is active on: 28.09.2023. Available from: <http://brni.info/archive/2018/1.html>
11. Zhuravleva N. Conceptual framework for assessing development effects projects of high-speed transport systems based on magnetic levitation. *Transportation Systems and Technology*. (In Russ.). 2019;5(1):89-102. doi:10.17816/transsyst20195189-102

12. Smirnov SA, Smirnova OY. Features of the assessment of socio-economic effects arising from the construction of lines of freight maglev transport. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(3):142-156 (In Russ.). doi: 10.17816/transsyst202283142-156
13. Smirnov SA, Smirnova OYu. Prospects of maglev transport in the unified integrated transport system Eurasian economic union. *Modern Transportation Systems and Technologies*. (In Russ.). 2023;9(2):110-120. doi: 10.17816/transsyst202392110-120
14. Zaitsev A, Klühspies J, Kircher R, et al. Maglev 2018. Abstracts of the 24th International Conference. St. Petersburg, Russian Federation. The link is active on: 28.09.2023. Available from: <http://mtstpgups.ru/pictures/mtst18-maglev2018/Theses-correction-30072018.pdf>

Сведения об авторах:

Казанская Лилия Фаатовна, доктор технических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 6073-9446; ORCID: 0000-0002-8734-1064; Scopus ID: 57205125533;
E-mail: yalifa@inbox.ru

Баталова Наталья Владимировна, старший преподаватель;
eLibrary SPIN: 4027-4771, ORCID: 0000-0002-5948-7226;
E-mail: natalyabatalova@yandex.ru

Information about the authors:

Lilia F. Kazanskaya, Doctor of technical sciences, Professor;
eLibrary SPIN: 6073-9446; ORCID: 0000-0002-8734-1064; Scopus ID: 57205125533,
E-mail: yalifa@inbox.ru

Natalia N. Batalova, Senior Lecturer;
eLibrary SPIN: 4027-4771, ORCID: 0000-0002-5948-7226;
E-mail: natalyabatalova@yandex.ru

Цитировать:

Казанская Л.Ф., Баталова Н.В. Инновационные технологии в развитии высокоскоростного наземного транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 108–116. doi: 10.17816/transsyst202394108-116

To cite this article:

Kazanskaya LF, Batalova NV. Innovative technologies in the development of high-speed ground transport. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(4):108-116. doi: 10.17816/transsyst202394108-116

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 338.47

DOI 10.17816/transsyst202394117-128

© М.Е. Васильева¹, Е.М. Волкова², А.С. Романов²¹ СПб ГУП «Горэлектротранс»² Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ В
РОССИЙСКИХ АГЛОМЕРАЦИЯХ: СУЩНОСТЬ, СТРУКТУРА И
НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ**

Цель: разработка направлений и определение этапов развития интеллектуальных транспортных систем в российских агломерациях с учетом их существенных особенностей, генерируемых ими эффектов и имеющихся проблем.

Материалы и методы: для достижения цели исследования на первом этапе используются систематизация и сравнительный анализ научных результатов, полученных российскими и зарубежными учеными по выбранной теме. На втором этапе авторы используют методы сводки и группировки полученных результатов, статистического анализа. На третьем этапе используется метод обобщения для формулировки рекомендаций по развитию интеллектуальных транспортных систем. Информационной базой исследования послужили материалы открытых источников, периодических изданий, а также интернет-ресурсов, в том числе аналитических отчетов и материалов Федеральной службы государственной статистики.

Результаты: Основным научным результатом является определение направлений и этапов развития интеллектуальных транспортных систем в российских агломерациях на основе решаемых ими задач в области управления пассажирским городским транспортом. Кроме того, определен перечень эффектов, генерируемых развитием интеллектуальных транспортных систем. Выявлены проблемы, сдерживающие развитие интеллектуальных транспортных систем в российских агломерациях.

Заключение: в результате проведения исследования авторами сформированы этапы развития интеллектуальных транспортных систем, предполагающие их интеграцию с концепцией «Мобильность как услуга» в российских агломерациях. Результаты могут быть использованы как пассажирскими транспортными компаниями, так и государственными органами исполнительной власти в регионах Российской Федерации.

Ключевые слова: городской транспорт, пассажирский транспорт, интеллектуальная транспортная система, пассажирские перевозки, мобильность населения, экономика транспорта, экономический эффект.

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© M.E. Vasilyeva¹, E.M. Volkova², A.S. Romanov²¹ SPb State Unitary Enterprise "Gorelektrotrans"²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)**INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS IN RUSSIAN MEGACITIES:
THE ESSENCE, STRUCTURE AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT**

Aim: to develop directions and determine the stages of development of intelligent transport systems in Russian agglomerations, taking into account their essential features, the effects they generate and the existing problems.

Materials and Methods: in order to achieve the research goal, at the first stage, systematization and comparative analysis of scientific results obtained by Russian and foreign scientists on the chosen topic are used. At the second stage, the authors use the methods of summarizing and grouping the results obtained, statistical analysis. At the third stage, the generalization method is used to formulate recommendations for the development of intelligent transport systems. The information base of the study was materials from open sources, periodicals, as well as Internet resources, including analytical reports and materials from the Federal State Statistics Service.

Results: The main scientific result is to determine the directions and stages of development of intelligent transport systems in Russian agglomerations based on the tasks they solve in the field of urban passenger transport management. In addition, a list of effects generated by the development of intelligent transport systems has been defined. The problems hindering the development of intelligent transport systems in Russian agglomerations have been identified.

Conclusion: as a result of the research, the authors have formed the stages of development of intelligent transport systems, suggesting their integration with the concept of "Mobility as a service" in Russian agglomerations. The results can be used by both passenger transport companies and state executive authorities in the regions of the Russian Federation.

Key words: urban transport, passenger transport, intelligent transport system, passenger transportation, population mobility, transport economics, economic effect.

ВВЕДЕНИЕ

Растущая урбанизация представляет собой серьезную многофакторную глобальную проблему, требующую целенаправленного развития системы управления различными функциональными сферами, в том числе транспортной. Численность населения, проживающего в городах, постоянно увеличивается и по прогнозам ООН к 2030 составит около 4,9 млрд человек [1]. Зависимость качества жизни городского населения от уровня развития транспортных систем значительно возросла, поскольку в настоящий период происходит обострение проблем в области транспорта: недостаточная пропускная и провозная способность видов

транспорта, неравномерность развития инфраструктуры, рост потерь времени в пути, увеличение количества ДТП и других.

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) обладают значительным потенциалом для решения проблем, являющихся следствием урбанизации: с помощью распространения информации о дорожной обстановке снижают нагрузку на улично-дорожную сеть городских территорий, обеспечивают безопасность движения за счет обработки большого объема данных, поступающих из различных источников, способствуют более эффективному использованию существующей транспортной инфраструктуры путем внедрения элементов управления движением и перераспределения транспортных потоков.

На данный момент продолжается укрупнение имеющихся городских поселений, что приводит к формированию полицентрических агломераций. Величина и степень проявления агломерационного эффекта в национальной экономике во многом определяется уровнем развития городской инфраструктуры, в том числе транспортной, в развивающихся агломерациях, и рациональной организацией управления потоками транспортных средств и пассажиров. В настоящий период имеется значительное число научных исследований и публикаций, посвященных развитию пассажирских транспортных систем в агломерациях, в том числе основанных на использовании элементов ИТС и концепции «Мобильность как услуга». Среди их авторов можно выделить М.А. Лякину [2], Н.А. Журавлеву [3], И.М. Гулого [4], Т.Г. Шульженко [5] и др.

Значительное количество исследований, посвященных цифровым транспортным технологиям, выполнено зарубежными учеными. Так, в статье [6] рассматриваются технико-технологические элементы, необходимые для функционирования интеллектуальной транспортной системы. В работе [7] исследуются вопросы трансформации перевозочного процесса с позиции инновационной теории. Авторы исследований [8], [9], [10], [11] обосновывают использование big data и нейронных сетей в качестве инструментов для формирования интеллектуальных транспортных систем. При возрастающем интересе научного сообщества к проблематике интеллектуальных транспортных систем большая часть исследований посвящена техническим вопросам, что является обоснованным ввиду наличия сложностей во внедрении новых технико-технологических достижений в текущие производственные процессы.

Кроме того, хотелось бы отметить малое количество научных исследований, обосновывающих рекомендации по развитию ИТС с учетом их сущности и специфики развития в российских агломерациях, в том числе в увязке с достигаемыми экономическими, финансовыми и социальными эффектами.

Подчеркнем, что ИТС появляются в агломерациях не только как результат научно-технического прогресса в транспортной отрасли, но и как

ответ на растущую мобильность населения. Имеющиеся инфраструктурные ограничения, негативно влияющие на мобильность городского населения, могут быть частично сняты посредством внедрения новых технологий управления дорожным движением и иных элементов интеллектуальных транспортных систем (ИТС). В то же время успешное развитие технологий ИТС обеспечивается на предварительном этапе транспортным планированием и определением места и роли каждого вида транспорта в городской транспортной системе. Для решения этой задачи следует определить понятие интеллектуальной транспортной системы, состав и взаимосвязи ее элементов, а также потенциальные эффекты ее функционирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для достижения цели исследования авторами был проведен анализ российских и зарубежных научных публикаций по теме исследования, а также государственного стандарта ГОСТ Р56294–2014 «Интеллектуальные транспортные системы. Требования к функциональной и физической архитектурам интеллектуальных транспортных систем». В результате систематизации их результатов, сравнительного анализа определений была определена сущность ИТС, выделены уровни ее структуры и сформированы задачи управления пассажирским транспортом, которые могут быть решены с применением интеллектуальных транспортных систем.

Далее был проведен анализ публикаций российских авторов, а также статистических данных, который позволил систематизировать эффекты, генерируемые развитием ИТС в агломерации, выделить проблемы их развития в российских городах, а также сформировать рекомендации по их применению.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В Табл. 1 представлено несколько определений ИТС, отличающихся перечнем выделяемых параметров.

Таблица 1. Систематизация определений понятия «Интеллектуальная транспортная система»

Определение	Автор(-ы) или источник
Комплексное использование сенсорных, компьютерных, электронных и коммуникационных технологий, а также стратегий управления для повышения безопасности и эффективности наземной транспортной системы	McGregor, R.V.; Eng, P.; MacIver, A.

Определение	Автор(-ы) или источник
Широкий спектр организационных и технологических систем, которые обеспечивают эффективную оптимизацию транспортных потоков и бесперебойное транспортное сообщение, сокращая количество узких мест транспортной сети.	Intelligent Transport Systems (ITS) for sustainable mobility
Применение технологий анализа, управления и связи на наземном транспорте с целью повышения безопасности, мобильности и эффективности.	Perspectives on Intelligent Transportation Systems (ITS)
Современные беспроводные, электронные и автоматизированные технологии, позволяющие интегрировать транспортные средства (транзитные, грузовые и личные), пользователей системы и инфраструктуру (дороги и транспорт).	Shaheen, S., Finson, R.
Сочетание высоких технологий и достижений в области информационных систем, связи, датчиков и передовых математических методов с инфраструктурой наземного транспорта.	Sussman, J. S.
Система автоматизированного взаимодействия между транспортными средствами и инфраструктурой для достижения высокого уровня безопасности, комфорта и оперативности в области транспортных коммуникаций.	Daniel, A., Paul, A., Ahmad, A. et al.
Интеграция системы связи и информационных технологий, предназначенная в первую очередь для повышения безопасности и эффективности транспортной сети.	Тураева Н., Парманкулов С., Эшмурадов Д.
Системы, создаваемые на основе интеграции средств автоматизации контроля и управления транспортом, информационных и коммуникационных технологий, ГНСС, динамических геоданных и единой информационной среды в транспортную инфраструктуру, транспортные средства, ориентированные на повышение безопасности и эффективности транспортных потоков и пользователей транспорта.	Маркелов В. М., Соловьев И. В., Цветков В. Я.

Источник: составлено авторами

Несмотря на заметную разницу в перечисляемых характеристиках ИТС, все исследователи сходятся в принципиальном значении информационных технологий для реализации ИТС. Основой ИТС являются информационно-коммуникативные системы, соединяющие технические элементы: датчики, средства наблюдения, спутники, базы данных и т. д.

Анализ состава элементов позволяет заключить, что ИТС в агломерациях имеют сложную структуру, которая включает ряд взаимосвязанных функциональных подсистем, которые могут применяться как в комплексе, так и изолированно. Перечень подсистем ИТС и их функций для агломераций представлен в Табл. 2. Таким образом, внедрение ИТС призвано решить важнейшие транспортные задачи: разгрузить транспортную инфраструктуру, повысить эффективность использования ресурсов пассажирского транспортного комплекса и качество обслуживания городского населения и др.

Таблица 2. Подсистемы ИТС и их функции для агломерации

Подсистема ИТС	Функция
Управления транспортными потоками	Регулирование загруженности улично-дорожной сети путем сдерживания растущих транспортных потоков в «узких местах»
Управления парками транспортных средств	Достижение баланса спроса и предложения на транспортные услуги посредством передислокации транспортных средств
Обеспечения безопасности дорожного движения	Информирование водителей и причастных органов власти о скорости транспортных потоков, пробках и ДТП, фотовидеофиксация нарушений ПДД
Взаимодействия транспортных средств с дорожной инфраструктурой / другими транспортными средствами	Регулирование фаз светофоров в целях обеспечения приоритетного движения общественного транспорта, отслеживание движения и расчет времени ожидания общественного транспорта на остановках
Системы экологического контроля за выбросами транспортных средств и их минимизации	Оперативное отображение информации с сигнализацией о превышении допустимых (фоновых) значений показателей в зоне влияния автомобильных дорог
Системы управления парковками	Мониторинг, подготовка и передача данных о наличии свободных объектов парковочного пространства
Системы взимания платы за проезд	Автоматическая оплата проезда в общественном пассажирском транспорте всех видов с использованием бесконтактных смарт-карт (БСК) и банковских карт

Источник: составлено авторами

При внедрении в транспортные системы новых технологий приоритет отдается четырем ключевым принципам: устойчивости, интеграции, безопасности и оперативности. Для эффективного функционирования интеллектуальных транспортных систем выделяют три уровня (Рис. 1).

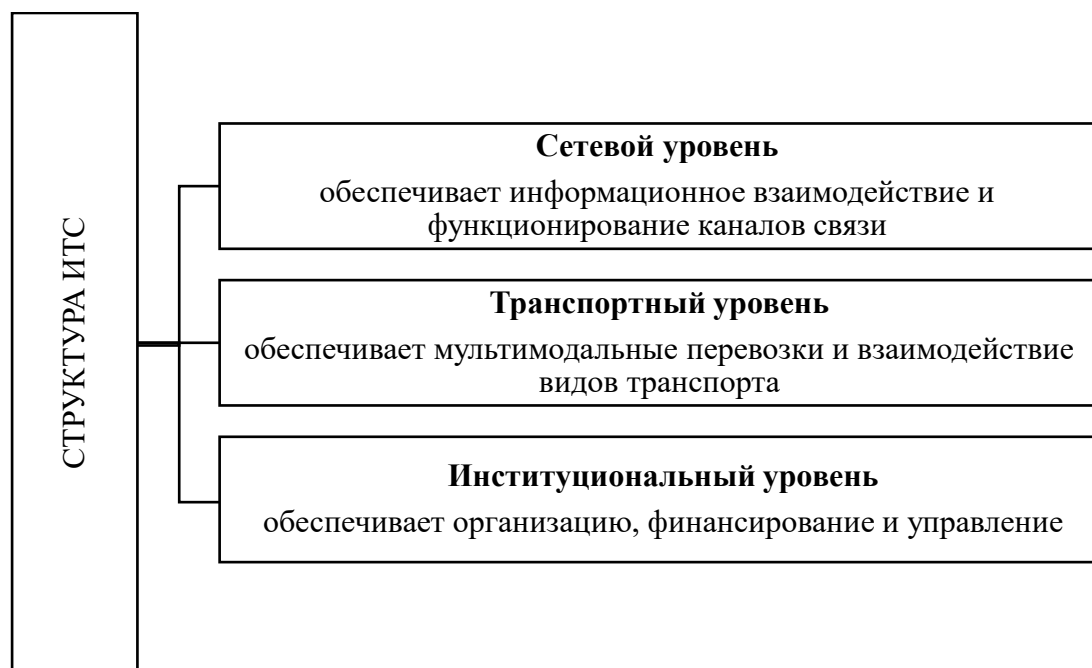


Рис. 1. Уровни структуры ИТС

Источник: составлено авторами

Итак, в большинстве определений (Табл. 1) содержание ИТС определяется в техническом аспекте (состав элементов, применяемые методы и средства), однако при этом упоминаются и цели ее внедрения, а также генерируемые ИТС эффекты на уровне транспортной системы (повышение мобильности населения, рост эффективности, безопасности, комфортности, ликвидация «узких мест»). Акцент делается как на эффективном использовании ресурсов транспортных систем, так и на возможности роста мобильности населения, сокращения временных и денежных потерь, повышения качества пассажирских транспортных услуг, их безопасности и экологичности. ИТС на современном этапе развития транспортных систем становятся **инструментом управления**, обеспечивающим рост эффективности использования ресурсов пассажирской транспортной системы и появление положительных экстерналий, в том числе агломерационного эффекта. На наш взгляд, эффекты, обусловленные внедрением и работой ИТС, имеет смысл систематизировать как с точки зрения содержания, так и с точки зрения выгодоприобретателей (Рис. 2).

Обратимся далее к российскому опыту внедрения ИТС. В Российской Федерации термин *Интеллектуальная транспортная система* (ИТС) впервые формально был определен в п. 2.1. ГОСТ Р 56294–2014 следующим образом:

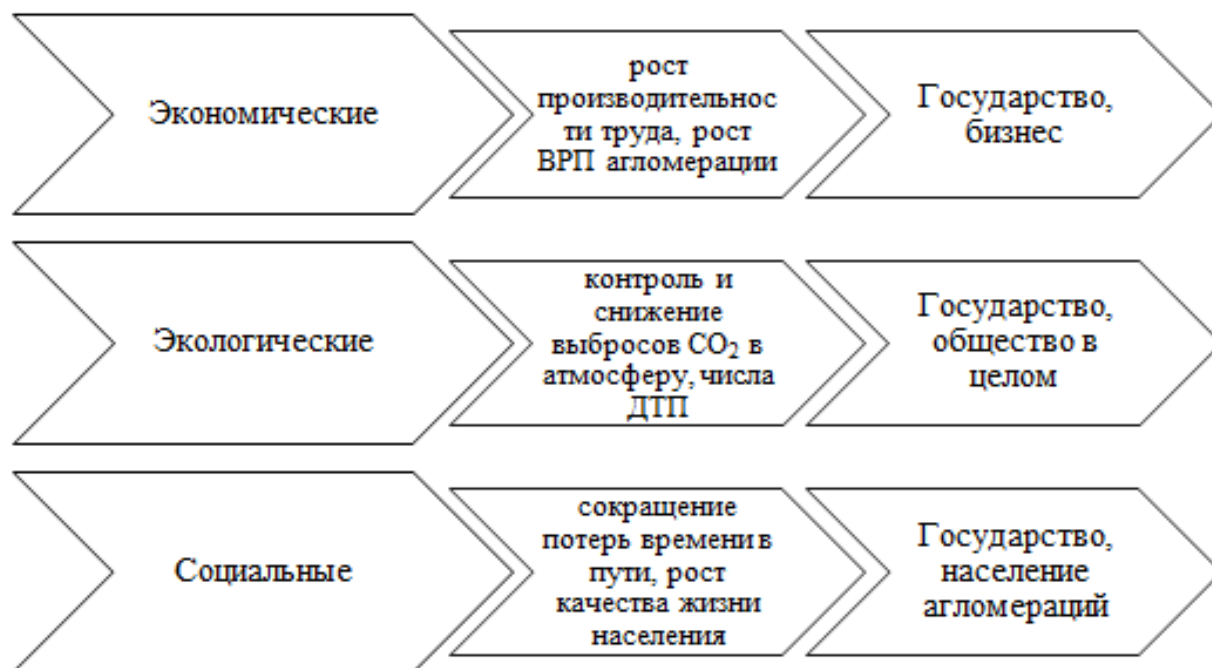


Рис. 2. Систематизация эффектов, генерируемых внедрением и работой ИТС

Источник: составлено авторами

ИТС – система, интегрирующая современные информационные, коммуникационные и телематические технологии, технологии управления и предназначенная для автоматизированного поиска и принятия к реализации максимально эффективных сценариев управления транспортно-дорожным комплексом региона, конкретным транспортным средством или группой транспортных средств с целью обеспечения заданной мобильности населения, максимизации показателей использования дорожной сети, повышения безопасности и эффективности транспортного процесса, комфортности для водителей и пользователей транспорта. Данное определение соответствует законодательной базе Российской Федерации и гармонизировано с международными стандартами. Его содержание соответствует авторским определениям, представленным в Табл. 1. Более того, в дефиниции подчеркивается организационно-управленческий аспект и цель обеспечения роста мобильности населения.

В Российской Федерации производится внедрение ИТС, однако носит фрагментарный характер. Принят к реализации национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги» [12], а также связанные с ним федеральные проекты в области дорожного хозяйства и автомобильного транспорта; запущен проект «Автодата» по сбору автомобильных данных [13]; ведутся разработки новых элементов транспортных систем (системы весогабаритного контроля без остановки ТС и др.), формируются проекты, связанные с применением новых прорывных технологий (беспилотный транспорт, магнитолевитационный

транспорт) [14, 15]. Дальнейшее внедрение и интеграция элементов различных уровней структуры ИТС позволят в перспективе перейти к практической реализации концепции «Мобильность как услуга» (MaaS) в российских агломерациях.

Концепция «Мобильность как услуга» предусматривает клиентоориентированный подход: управление транспортным поведением пассажиров и качеством транспортного обслуживания. Логическая взаимосвязь этапов внедрения ИТС и MaaS в целях повышения качества комплексного транспортного обслуживания населения агломераций представлена на Рис. 3.

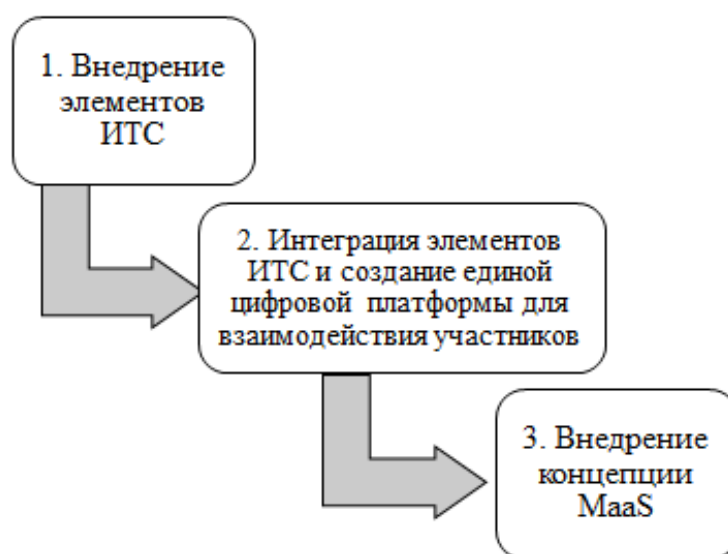


Рис. 3. Этапы повышения качества комплексного транспортного обслуживания населения в агломерациях

Источник: составлено авторами

Концепция («Мобильность как услуга») целесообразна к внедрению после предварительной интеграции элементов ИТС и создания цифровых возможностей для планирования, маршрутизации и оплаты мультимодальных поездок.

В отечественных агломерациях на настоящий момент реализован первый этап повышения качества комплексного транспортного обслуживания населения (Рис. 3). Для эффективного функционирования ИТС и получения синергетического эффекта от взаимодействия ее элементов, в свою очередь, необходим переход ко второму и третьему этапам. Второй этап возможно реализовать за счет создания квазиинтегрированной структуры – кластера транспортных компаний городских агломераций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ информационных источников по теме исследования позволил заключить, что на современном этапе систем управления городским пассажирским транспортом в агломерациях ИТС становятся одним из важных инструментов, позволяющих решить транспортную проблему и обеспечить возможности роста мобильности населения.

Проведенный анализ показал целесообразность повышения эффективности использования ресурсов пассажирского транспортного комплекса и качества транспортного обслуживания населения за счет внедрения ИТС. Организационно-управленческий потенциал ИТС может быть реализован при использовании концепции MaaS («Мобильность как услуга»), внедрение которой предполагает интеграцию элементов ИТС на трех уровнях: сетевом, транспортном и институциональном. В российских агломерациях в настоящее время целесообразным является переход к интеграции внедренных элементов ИТС. Для решения этой задачи в агломерации может быть создан кластер транспортных компаний, в рамках которого будет происходить интегрированное планирование и внедрение цифровых решений в пассажирскую транспортную систему.

Авторы заявляют, что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Current World population [Internet]. [cited 01.12.23]. Available from: <https://www.worldometers.info/world-population/>.
2. Рахимов О.О., Лякина М.А. Цифровая платформа как элемент управления транспортной системой городской агломерации // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы. сборник трудов LXXXII Всероссийской научно-технической конференции. – 2022. – с. 101–105. [Rahimov OO, Lyakina MA. Cifrovaya platforma kak element upravleniya transportnoj sistemoj gorodskoj aglomeracii In: *Proceedings of the National Scientific and Practical Conference "Transport: problemy, idei, perspektiv"*. 2022 April; St. Petersburg. pp. 101-105. (In Russ.)] Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49981402> Ссылка активна на 01.12.23.
3. Журавлева Н.А., Никитин А.Б. Экономическая безопасность интеллектуальных транспортных систем. – СПб: ООО «ИНСЭИ-оценка», 2022. – 119 с. [Zhuravleva NA, Nikitin AB. *Ekonomicheskaya bezopasnost' intellektual'nyh transportnyh sistem*. St. Petersburg: INSEI-ocenka; 2022. 119 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 01.12.23. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49703263>
4. Гулый И.М. Методология оценки экономических эффектов инвестирования в цифровые технологии на транспорте // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – с. 124–133. [Guliy IM. Methodology for assessing the

- economic effects of investing in digital technologies in transportation. *Transportation Systems and Technology*. 2019;4(4):124-133. (Russ, Eng.)). doi: 10.17816/transsyst201954124-133
5. Шульженко Т.Г., Жук А.Е., Иванова Д.П. Логистика новой городской мобильности: ценностно ориентированный подход / под ред. Шульженко Т.Г. – М.: ИНФРА-М, 2023. – 546 с. [SHul'zhenko TG, ZHuk AE, Ivanova DP. *Logistika novoj gorodskoj mobil'nosti: cennostno orientirovannyj podhod*. SHul'zhenko TG, editor. Moscow: INFRA-M; 2014. 546 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://naukaru.ru/ru/nauka/monography/2823/view> Ссылка активна на 01.12.23.
 6. Agafonova N, Pokrovskaya OD, Merkulina IA. Digital transformation of logistics and SCM. *The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences*. 2019; 522-529. doi: 10.15405/epsbs.2020.04.67
 7. Singh B, Gupta A. Recent trends in intelligent transportation systems: a review. *Journal of Transport Literature*. 2015;(9):30-34. doi: 10.1590/2238-1031.jtl.v9n2a6
 8. Hasegawa T. Toward the mobility-oriented heterogeneous transport system based on new ICT environments – Understanding from a viewpoint of the systems innovation theory. *IATSS Research*. 2018;42(2):40-48. doi: 10.1016/j.iatssr.2018.07.001
 9. Sumalee Agachai, Ho HW. Smarter and more connected: Future intelligent transportation system. *IATSS Research*. 2018;42(2):67-71. doi: 10.1016/j.iatssr.2018.05.005
 10. Qureshi K, Abdullah H. A Survey on Intelligent Transportation Systems. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2013;15:629-642. doi: 10.5829/idosi.mejsr.2013.15.5.11215
 11. Oladimeji D, Gupta K, Kose NA, et al. Smart Transportation: An Overview of Technologies and Applications. *Sensors*. 2023;23(8):3880. doi: 10.3390/s23083880
 12. Паспорт национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги». [Pasport nacional'nogo proekta “Bezopasnye i kachestvennyye avtomobil'nye dorogi”. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 01.12.23. Доступно по: <https://www.consultant.ru/>
 13. Национальный стандарт «Платформа «Автодата» (ГОСТ Р 59237-2020). [Nacional'nyj standart “Platforma “Avtodata” (GOST R 59237-2020) [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 01.12.23. Доступно по: <https://docs.cntd.ru/document/1200177414?ysclid=lps0dlu86652362274>
 14. Смирнов С.А., Смирнова О.Ю., Соколова Я.В. Методика оценки эффектов от реализации проектов строительства новых линий пассажирского магнитолевитационного транспорта // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 161–173. [Smirnov SA, Smirnova OY, Sokolova IV. Approach of evaluation the effects from implementation the projects of construction new passenger maglev lines. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(1):161-173. (Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst202061161-173
 15. Коробеев А.И., Чучаев А.И. Беспилотные транспортные средства: новые вызовы общественной безопасности. *Lex Russica*. 2019;2(147):9-28. [Korobeev AI, CHuchaev AI. Bepilotnye transportnye sredstva: novye vyzovy obshchestvennoj bezopasnosti. *Lex Russica*, 2019;2(147):9-28. (In Russ.)]. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/bespilotnye-transportnye-sredstva-novye-vyzovy-obshchestvennoj-bezopasnosti>. Ссылка активна на 01.12.23.

Сведения об авторах:

Волкова Елена Михайловна, к.э.н., доцент;

eLibrary SPIN:6886-5796; ORCID: 0000-0003-0620-463X;

E-mail: moonlight34@ya.ru

Васильева Мария Евгеньевна, специалист;

E-mail: m.petrova@spbget.ru

Романов Алексей Станиславович, к.э.н., старший преподаватель;

SPIN: 4634-9738; ORCID: 0000-0001-9088-4361

E-mail: Alexey-95-31@mail.ru

Information about the authors:

Elena M. Volkova, Candidate of Economic Sciences, associate professor;

eLibrary SPIN:6886-5796; ORCID: 0000-0003-0620-463X;

E-mail: moonlight34@ya.ru

Maria E. Vasilyeva, specialist;

ORCID: 0000-0000-0000-0000;

E-mail: m.petrova@spbget.ru

Alexey S. Romanov, Candidate of Economic Sciences, lecturer;

SPIN: 4634-9738; ORCID: 0000-0001-9088-4361;

E-mail: alexey-95-31@mail.ru

Цитировать:

Васильева М.Е., Волкова Е.М., Романов А.С. Интеллектуальные транспортные системы в российских агломерациях: сущность, структура и направления развития // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 117–128. doi: 10.17816/transsyst202394117-128

To cite this article:

Vasilyeva ME, Volkova EM, Romanov AS. Intelligent transport systems in russian megacities: the essence, structure and directions of development. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(4):117-128. doi: 10.17816/transsyst202394117-128

2023;9(4)

Электронный

оригинал-макет

подписан к публикации

25.12.2023

128 страниц Ф А4

сверстан в редакции ПГУПС

190131, Санкт-Петербург,

Московский пр., д. 9