

# ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

MODERN  
TRANSPORTATION  
SYSTEMS AND  
TECHNOLOGIES  
peer-review journal

[transsyst.ru](http://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)  
ВАК (Высшая аттестационная комиссия)  
Google Scholar  
WorldCat  
Crossref  
CyberLeninka

**КОНТАКТЫ**

**Адрес:** 190031, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 115, ауд. 9/11-5  
**E-mail:** [transyst@mail.ru](mailto:transyst@mail.ru)  
**WEB:** [www.transyst.ru](http://www.transyst.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://transyst.ru/> Рукопись и дополнительные материалы следует оформить в соответствии с правилами редакции, см. подробно по <https://transyst.ru/transyst/about/submissions>

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

Том 9, № 1

2023

**РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ****ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

**Панычев Александр Юрьевич**  
к.э.н., доцент, ректор ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА**

**Титова Тамила Семёновна**  
д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Первый проректор – Проректор по науке 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;  
**Верескун Владимир Дмитриевич**, д.т.н., профессор, ректор, РГУПС, Ростов-на-Дону, 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 Иоханнес**, 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 Сирангси**, 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;  
**Смирнов Сергей Александрович**, Руководитель Научно-образовательного центра инновационного развития пассажирских железнодорожных перевозок им. А.А. Зайцева 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. Smirnova  
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://trassyst.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 1

2023

**PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL****EDITOR-IN-CHIEF**

**Aleksandr Y. Panychev**

PhD, Associate professor, rector PGUPS, St. Petersburg, Russia

**Deputy 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

**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;

**Vladimir D. Vereskun**, Dr. Sc., Professor, Rector of Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, 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. Ledyev**, 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. Podsorin**, 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;

**Sergey A. Smirnov**, Head A.A. Zaitsev Scientific and educational center for the innovative development of passenger rail transport PGUPS, St. Petersburg, Russia;

**Vladimir A. Solomin**, Dr. Sc., Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;

**Richard Magdalena 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;

**Smirnov Sergey** PGUPS, St. Petersburg, 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.

<b>СОДЕРЖАНИЕ</b>		<b>TABLE OF CONTENTS</b>
<b>ОБЗОРЫ</b>		<b>REVIEWS</b>
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ</p> <p>Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей</p> <p>Стэфан Р.М., Дэнг З.</p> <p>Прошлое, настоящее и будущее сверхпроводящей магнитной левитации</p>	5	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS</p> <p>Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels</p> <p>Stephan R.M., Deng Z.</p> <p>Past, Present and Future of Superconducting Magnetic Levitation (SML)</p>
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ</p> <p>Направление – Строительные конструкции, здания и сооружения</p> <p>Васильев К.А., Аверченко Г.А.</p> <p>Замечания по развитию метода предельных состояний в области металлических конструкций</p>	20	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS</p> <p>Field – Building structures, buildings and structures</p> <p>Vasilev K.A., Averchenko G.A.</p> <p>Remarks on the development of the limit state method in the field of metal structures</p>
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ</p> <p>Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы</p> <p>Ахтямов Р.Г.</p> <p>Разработка подходов к адаптации транспортной инфраструктуры к климатическим изменениям</p>	34	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS</p> <p>Field – Ground transport and logistics facilities and complexes</p> <p>Akhtyamov R.G.</p> <p>Development of approaches for transport infrastructure adaptation to climatic change</p>
<b>ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ</b>		<b>ORIGINAL STUDIES</b>
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ</p> <p>Направление – Строительные конструкции, здания и сооружения</p> <p>Сенькин Н.А., Андреев Д.М., Васильев В.С.</p> <p>Предложения по созданию высокоскоростных транспортных магистралей в Арктической зоне: конструкции и технологии</p>	44	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS</p> <p>Field – Building structures, buildings and structures</p> <p>Senkin N.A., Andreev D.M., Vasilev V.S.</p> <p>Proposals for the creations of high-speed transport Highways in The Arctic zone: Constructions and Technologies</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ</p> <p>Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы</p> <p>Доманов К.И., Богунов К.В.</p> <p>Эффективность эксплуатации электровозов ЗЭС6 на Урало-сибирском полигоне</p>	64	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS</p> <p>Field – Ground transport and logistics facilities and complexes</p> <p>Domanov K.I., Bogunov K.V.</p> <p>Efficiency of operation of 3ES6 electric locomotives at the Ural-Siberian polygon</p>

<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнические комплексы и системы</p> <p>Горлов А.В., Волчанина М.А., Пономарев А.В., Кузнецов А.А.</p> <p>Исследование высоковольтных разрядов в масле на имитаторе с различным набором дефектов</p>	83	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnical complexes and systems</p> <p>Gorlov A.V., Volchanina M.A., Ponomarev A.V., Kuznetsov A.A.</p> <p>Investigation of high-voltage discharge in oil on a simulator with a different set of defects</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ</p> <p>Лисов А.А., Кулганатов А.З., Панишев С.А.</p> <p>Акустическое обнаружение транспортных средств аварийных служб с использованием сверточных нейронных сетей</p>	95	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Mathematical modeling, numerical methods and software packages</p> <p>Lisov A.A., Kulganatov A.Z., Panishev S.A.</p> <p>Using convolutional neural networks for acoustic-based emergency vehicle detection</p>
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы</p> <p>Богачев В.А., Кравец А.С., Богачев Т.В.</p> <p>Математический эксперимент в логистических исследованиях мультимодальных грузоперевозок с временными и стоимостными показателями</p>	108	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Ground transport and logistics facilities and complexes</p> <p>Bogachev V.A., Kravets A.S., Bogachev T.V.</p> <p>Mathematical experiment in logistics research of multimodal freight transportation with time and cost indicators</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ</p> <p>Лямина Е.А., Новожилова О.В.</p> <p>Дизайн равнопрочного вращающегося диска</p>	122	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Mathematical modeling, numerical methods and software packages</p> <p>Lyamina E.A., Novozhilova O.G.</p> <p>Design of equi-strength rotating disk</p>
<p>Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА</p> <p>Смирнов С.А., Смирнова О.Ю.</p> <p>Социально-экономический подход к оценке инвестиций на транспорте</p>	135	<p>Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS</p> <p>Smirnov S.A., Smirnova O.Yu.</p> <p>Socio-economic approach to transport investments evaluation</p>

---

**Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS**

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

DOI 10.17816/transsyst2023915-19

© **R.M. Stephan<sup>1</sup>, Z. Deng<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Federal University Rio de Janeiro

(Rio de Janeiro, Brazil)

<sup>2</sup> Southwest Jiaotong University

(Chengdu, China)

### **PAST, PRESENT AND FUTURE OF SUPERCONDUCTING MAGNETIC LEVITATION (SML)**

A review of Superconducting Magnetic Levitation (SML) applied to MagLev trains will be presented. The paper is divided into low-speed and high-speed MagLev. The promising perspectives will close this review.

**Key words:** Superconducting Magnetic Levitation, Urban Transportation, High-speed Transportation, MagLev Second Generation, Technological Innovation, MagLev history.

---

**Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ**

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

© **Р.М. Стефан<sup>1</sup>, З. Денг<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Федеральный университет Рио-де-Жанейро

(Рио-де-Жанейро, Бразилия)

<sup>2</sup> Юго-западный университет Цзяотун

(Чэнду, Китай)

### **ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ**

Будет представлен обзор сверхпроводящей магнитной левитации, применяемой в поездах MagLev. Статья освещает действующие низкоскоростные и высокоскоростные линии MagLev. Многообещающие перспективы завершат этот обзор.

**Ключевые слова:** сверхпроводящая магнитная левитация, городской транспорт, высокоскоростной транспорт, второе поколение MagLev, технологические инновации, история MagLev.

## 1. INTRODUCTION

The Superconducting Magnetic Levitation (SML) method applied to MagLev relies on high critical temperature superconductors (HTS) and rare earth permanent magnets, synthesized at the end of the last century [1, 2]. The availability of these materials for commercial applications, as expected, took some years. Therefore, the first prototypes of SML MagLev appeared at the turn of the century, practically 40 years after available prototypes of EML (Electromagnetic Levitation) and EDL (Electrodynamic Levitation) MagLev vehicles.

Disregarding small demonstrations, the first man-loaded example of SML has been presented in Chengdu, by Wang and his research group [3] in 2000. This example was followed by prototypes in Rio de Janeiro, Brazil [4], in Dresden Germany [5], and improvements in Chengdu, China [6]. These initial systems operated inside laboratories, in controlled environmental conditions and just for demonstration. A first outdoor prototype, presenting the conditions of a real urban transportation system, was disclosed at the last day of the 22<sup>nd</sup> MagLev Conference in 2014 [7]. A second outdoor prototype was launched on January 13<sup>th</sup>, 2021 at Southwest Jaotong University aiming high speed transportation.

The SML presents advantages, compared with EML and EDL solutions, regarding the stability of the levitation method, the slender elevated structures, and the simpler switch pieces of equipment. These characteristic leads to a lighter MagLev solution, suggesting a new category of MagLev vehicles that could be properly named MagLev<sup>2</sup>. The exponent 2 reports to the Levitation and Light (Levis in Latin) properties, also bringing the message of a second generation of MagLev vehicles. In fact, besides applications for urban transportation, investigations are carried out to apply the SML technology for high-speed MagLev [8] as well.

*Table 1. MAGLEV<sup>2</sup> SML AS A SECOND GENERATION OF MAGLEV VEHICLES*

English	Latin	Initial
Magnetic	Magneticus	Mag
Levitation	Levitatio	Lev
Light	Levis	Lev

In this paper, details of the past, present and future developments of the SML Technology will be disclosed for discussion. It is an updated version of a previous paper published in 2018 [9] and shows how much has been done in these 4 years even with the difficulties imposed by COVID-19.

## II. LOW SPEED SML MAGLEV

The first SML outdoor prototype was inaugurated on October 1<sup>st</sup> 2014, the last day of the 22<sup>nd</sup> International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (Fig. 1). The conference participants were able to ride in the vehicle, which, at that time, as a recently inaugurated project, still had some restrictions of operation.



Fig. 1. The last day of MagLev Conference in 2014

After one year of improvements, regular demonstrations, every Tuesday, started to visitors. The line is 200 meters long (Fig. 2), and the vehicle can carry 20 passengers at a speed of 12 km/h. Until COVID19 reached Brazil at the beginning of 2020, more than twenty thousand persons experienced the ride [10, 11].



Fig. 2. The 200 meters long elevated line of MagLev-Cobra

The graphical abstract depicted in Fig. 3 summarizes the technology.

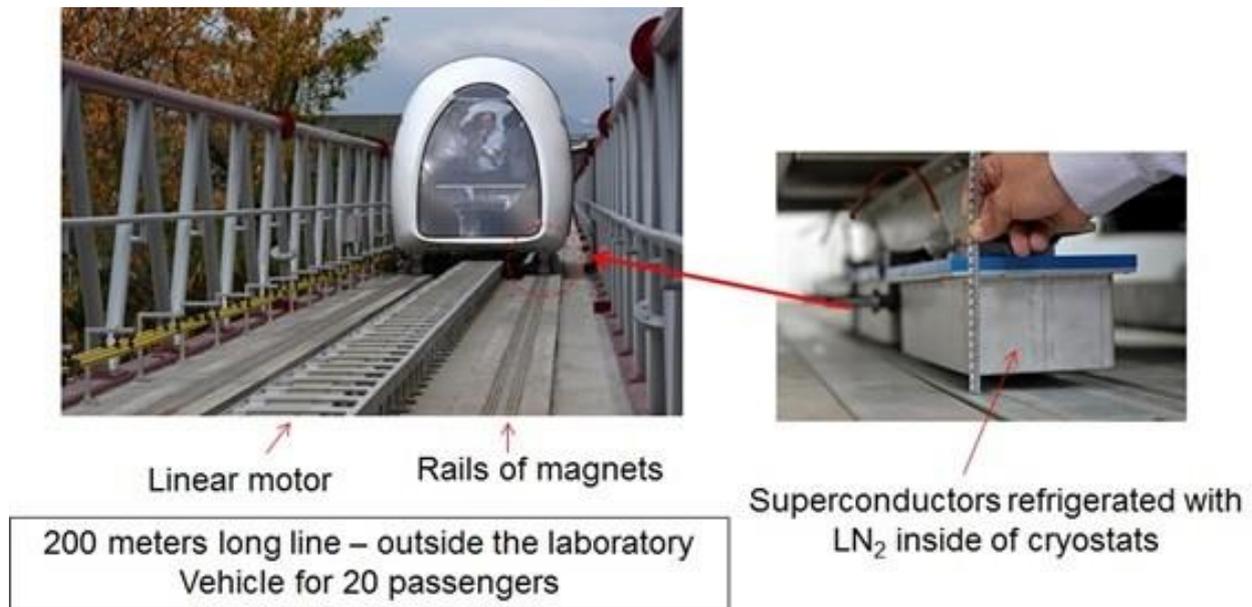


Fig. 3. Graphical abstract of the MagLev-Cobra project

The critical period of 2020-2021 was also a time for reflection and planning. The two main lessons can be summarized in the following points:

1. The weekly regular demonstrations of the MagLev-Cobra inside the university campus were interesting but not sufficient to go forward and turn the technology into a practical application. The virus was helpful to call our attention to this fact, that now sounds obvious, but was not in 2019.

2. A Public Privat Partnership (PPP) would be the best way to surpass the difficulties. For that, the public investment had to come first, but the private sector should also be prepared to assume responsibilities.

Based on these lessons, an aggressive search for funds and partners was launched. This was not restricted to national investors, but also international ones were contacted. Discussions with 6 potential partners and 4 projects to rise public funds were done during these two years. To make a long history short, finally, at the end of 2021, we signed MOUs with 3 Brazilian companies:

- Aerom Sea Horse
- Equacional

Moreover, we received the support of FAPERJ (research council of the State of Rio de Janeiro) to put an industrial prototype in daily operation. The start is foreseen to October 2023. The vehicle design is shown in Fig. 4.

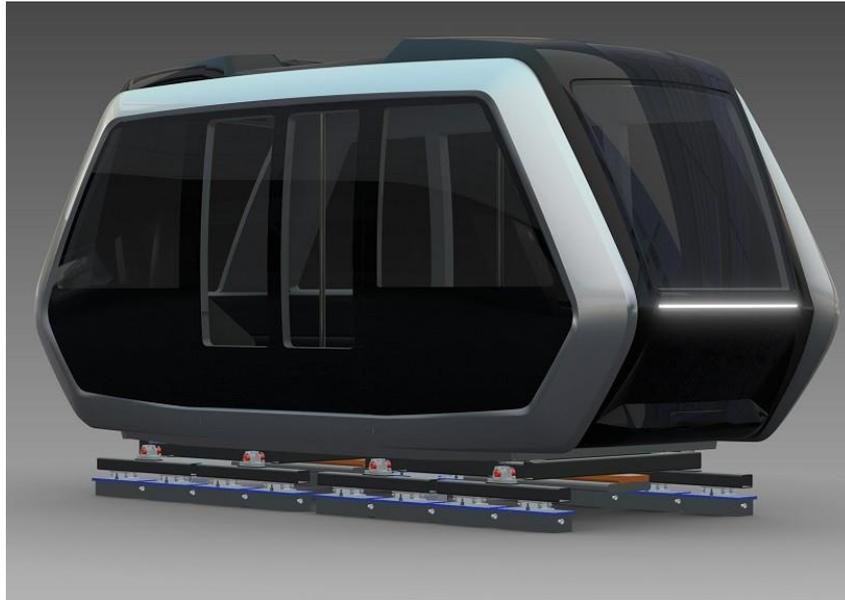


Fig. 4. Industrial prototype in development (Aerom)

The linear motor was also improved following Oliveira's Ph.D. research thesis [12, 13]. This can be seen in Fig. 5.



Fig. 5. Improved linear motor

Parallel to this work, the study of an 1km long line connecting the Centre of Technology to the Technological Park of the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ) has been the object of an internal competition of the Faculty of Architecture and Urbanism (Fig. 6).

### III. HIGH SPEED SML MAGLEV

This part mainly focuses on the development in the high-speed scenes, which is contributed by Southwest Jiaotong University, Chengdu, China.

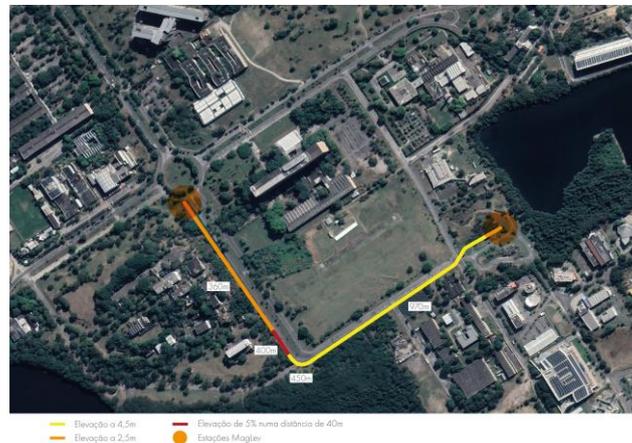


Fig. 6. The proposed 1 km MagLev-Cobra line

#### A. *Linear High-speed Test Platform*

For high-speed scenarios of SML in rail transit, a linear test platform [14] presented in Fig. 7 is developed for exploring the dynamic response during extreme and critical operations. Its tube can create a low-pressure environment for further research on train aerodynamics or hyperloop.



Fig. 7. The SML high-speed test platform

This platform is mainly composed of three components:

(1) the levitation system (i.e., a permanent magnet guideway (PMG) and a levitated model); (2) the linear propulsion system (involves a power supply, a control, and a linear motor); (3) the eddy-current braking which utilizes the permanent magnets. The main parameters are summarized in Table II.

As sketched in Fig. 8, the 142.6 m long PMG which arranged in a Halbach array for a stronger magnetic field is divided into an acceleration section, a sliding section, and a braking section. This dual guideway has a 173 mm gauge and is tightly assembled from several 1152 mm long segments.

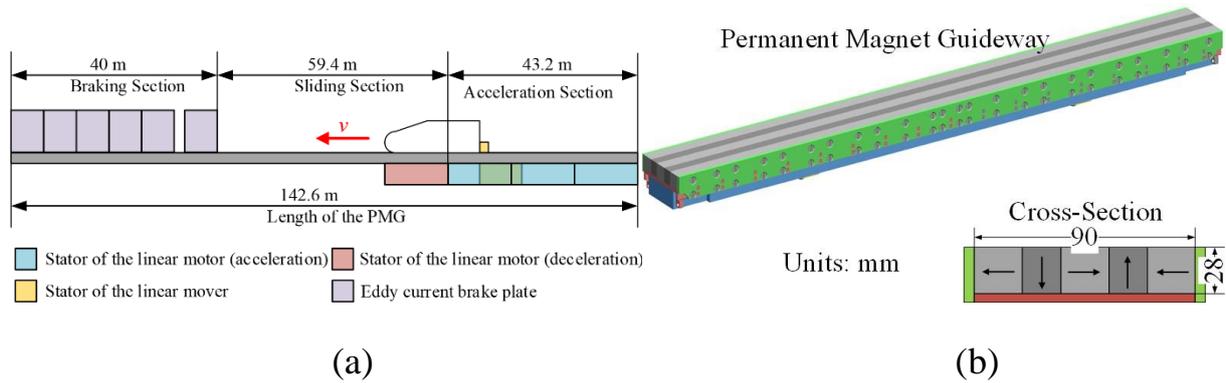


Fig. 8. (a) Schematic diagram of the test line and (b) structure of the PMG

Table II. Main parameters of the linear high-speed test-platform

Item	Parameter
Scale	1:10
Length of the test line	142.6 m
Diameter of the tube	4.2 m
Levitation height	10-20 mm
Load capability	200 kg
Propulsion mode	Linear motor
Maximum propulsion force	70 kN
Maximum test speed	120 m/s

Due to the limitation of the length, the model withstands an approximately 15 g acceleration and 70 kN traction force to reach a speed of 120 m/s (432 km/h) within 50 m. This platform therefore requires large energy output in a very short time (the total power of the motor reaches 16 MW), which is provided by a flywheel energy storage (the storage energy reaches 28.5 MJ). The traction force is transmitted by contact between the motor mover and the vehicle body. Once the motor decelerates, the vehicle will separate from the mover and keep moving by inertia. When the model vehicle reaches the braking section, the permanent magnets on the vertical brake plate on both sides of PMG interact with the aluminum alloy shell of the model vehicle to produce braking force.

The dynamic model test platform adopts the reduced scale model, which can simulate the actual dynamic response of the SML vehicle at high speed accurately. In addition, the high-speed test platform can also serve the research of vehicle aerodynamics.

Fig. 9 shows the structure and appearance of the levitated model with 2.1 m long and 120 kg weight. It has four levitation units to provide the stable levitation and guidance force, and eight wheels to support its weight at non-levitation state. The material of the shell is aluminum alloy, which is a good conductor for eddy current braking, moreover, it is not only lightweight but also

non-ferromagnetic (little interact with a PMG. Four three-axis accelerometers are installed above the four levitation units (only one is powered currently at the red spot in Fig. 9b), and four laser displacement sensors will be installed beside the levitation units as well. The levitation unit is introduced in [14].

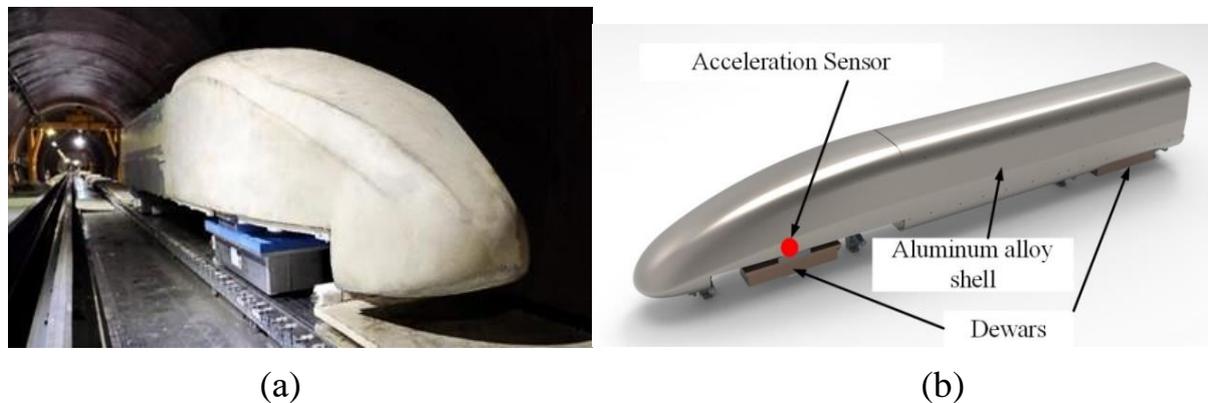


Fig. 9. The (a) photo and (b) schematic diagram of the model vehicle in High-speed Test-Platform

### B. *Rotating High-speed Test-Platform*

The cost efficiency is quite low to measure the dynamic characteristics of the SML vehicle running on an actual line at ultra-high speed; therefore, the ultra-high-speed maglev test rig is established based on the principle of equivalence. A rotating circular guideway is applied to replace the translational motion of the levitation vehicle. Moreover, a vibration exciter is introduced to directly excite the test samples, and it is equivalent to replacing the vibration caused by track irregularities. The test rig is shown in Fig. 10 [15]. The experimental conditions are set through the control system and can automatically collect the experimental data and complete the storage during the experiment.

In this test rig, an inverter-fed AC motor with a rated power of 550 kW drives the stainless-steel rotor with a diameter of 2500 mm to rotate. The key component of the rotational plate is a T shape. To overcome the centrifugal force, the Halbach- array PMG and aluminum guideway fixed on the two inner sides of the stainless-steel rotor will rotate together, and the structure is shown in [15]. The inner surface diameters of the two guideways are both 2210 mm. Its maximum linear speed of the guideway reaches 600 km/h when the stainless-steel rotor rotates around the central axis at 1440 rpm, and the rotor speed error is less than 1 % under the adjustment of the control system. The total mass of the guideway rotor is 8.2 t. The technical specifications are introduced in Table III.

To ensure its stable operation under the experimental speed of 600 km/h, its development top-speed standard has been increased to 700 km/h. The measurement system of the test rig is equipped with an electromagnetic

vibrator, triaxial force sensor, vibration sensor, laser displacement sensor, servo linear displacement drive device, etc., making sure a more comprehensive experimental study on dynamic levitation characteristics of SML can be carried out. The development of ultra-high-speed maglev test rigs can provide necessary experimental conditions for the research on the high-speed operation of SML, which will play an important role in promoting the research and engineering application of maglev technology.



Fig. 10. The (a) photo and (b) schematic diagram of the rotating High-speed Test-Platform

### c. Engineering prototype

On January 13, 2021, a full-scale engineering SML vehicle and test line rolled off at Southwest Jiaotong University, China [16], as shown in Fig. 11. Since the official opening of the high-speed SML engineering prototype and test line, the project has received more than 70 visits from various fields.

The full-scale engineering SML vehicle operates stably, and the cumulative running time of the vehicle exceeds 900 hours, nearly 10,000 visitors have been transported in total.

Table III. Main parameters of the rotating platform

Item	Parameter
Diameter of the stainless-steel rotor	2500 mm
Width of the stainless-steel rotor	520 mm
Dynamic balance accuracy grade	G2.5
Maximum speed	600 km/h (1440 rpm)
Speed error of the guideway	$\leq 1\%$
Maximum excitation force of vibrator	350 N
Maximum amplitude of vibrator	10 mm
Variable frequency AC motor power	550 kW



(a)

(b)

Fig. 11. Engineering prototype of SML in Chengdu, China. (a) Photo;  
(b) display inside the carriage

This engineering prototype of SML is a comprehensive large-scale system including suspension, propulsion, braking, operation control, and other aspects as shown in Fig. 12. The track adopts a U-shaped track beam. Mechanical brake plates are installed on two sides of the track beam. The permanent magnet dual track is introduced in [16]. The linear synchronous motor for vehicle propulsion lies in the middle of the tracks and the ground positioning system is used for speed measurement and positioning. In addition, the engineering prototype is also equipped with a safety support track for the field cooling procedure of SML and supporting the vehicle after the bulk superconductors enter the normal state.

The main parameters of the engineering prototype are shown in Table IV. Southwest Jiaotong University completed the transformation of the existing engineering test platform in January 2022 to further promote the engineering process of SML. The engineering traction and speed measurement and positioning system, condition monitoring system, vehicle ground communication, and integrated operation control system were optimized, and an 8-m long test platform was built. An upgraded model vehicle for testing was also developed. The new 8-m dynamic model test platform is shown in Fig. 13a, and the upgraded model vehicle is shown in Fig. 13b.

At present, the performance verification of the long-stator single-sided three-phase coreless permanent-magnet linear synchronous traction system was completed. The traction system realizes various functions, e.g., speed tracking, position control, fast and uniform start, uniform acceleration and deceleration, fixed-point parking with a  $<150$  mm parking error.

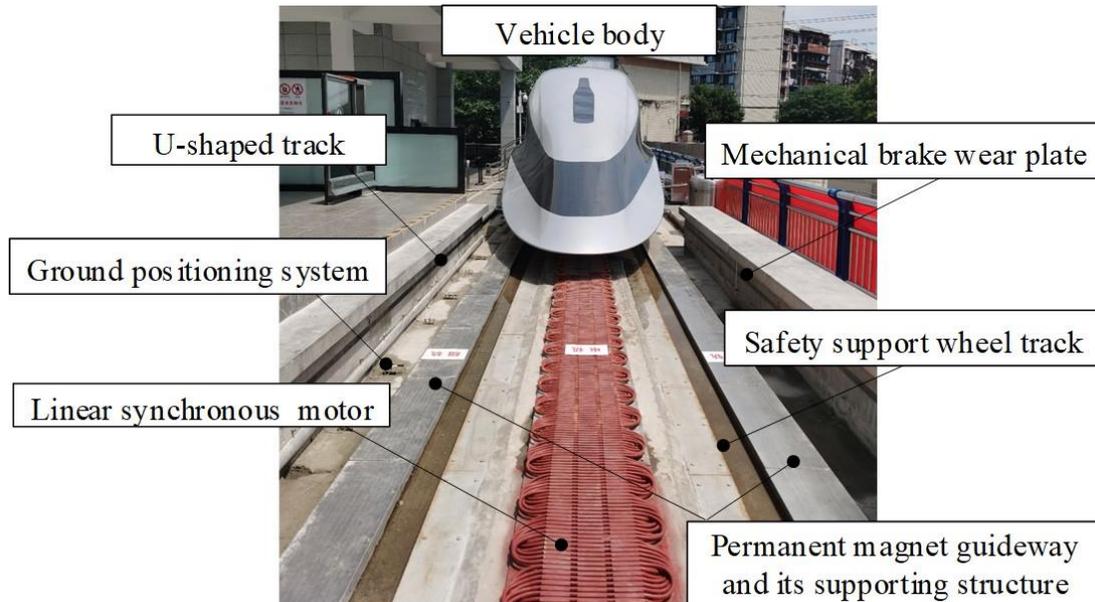


Fig. 12. Main structure of the engineering prototype of SML

Table IV. Main design parameters of the engineering prototype

Item	Parameter
Length of the test line	165 m
PMG gauge	2 m
Rated Levitation height	10 mm Levitation height
Load capability	15 t
Maximum load	30 people
Propulsion mode	Linear synchronous motor max. propulsion force
Design speed	620 km/h



(a)



(b)

Fig. 13. Transformation of the SML engineering test-platform:  
(a) The test-platform; (b) the upgraded model vehicle

#### IV. COMPARISON: SML AND TRADITIONAL MAGLEV

##### A. *Levitation System*

The SML technology is intrinsically stable, just the PM rail and the cryostats (the wheels of this technology) are necessary to achieve levitation, as already shown in Fig. 3. On the other hand, the stability of the EML can be obtained only with a closed loop control system, which requires sensors, signal processing, A/D and D/A converters, EMI (Electromagnetic Interference) reduction, back-up energy supply and heavy and bulk electromagnetic actuators made of iron core and copper windings. Fig. 14 turns this advantage of the SML technology evident.

##### B. *Civil Engineering Construction*

As a direct consequence of the simplicity of the SML method and its lower weight, the civil engineering construction of the SML technology presents advantages in comparison with EML systems, as shown in Fig. 15. As proof of this, the Brazilian prototype for 20 people weighs only 2.3 tons empty.

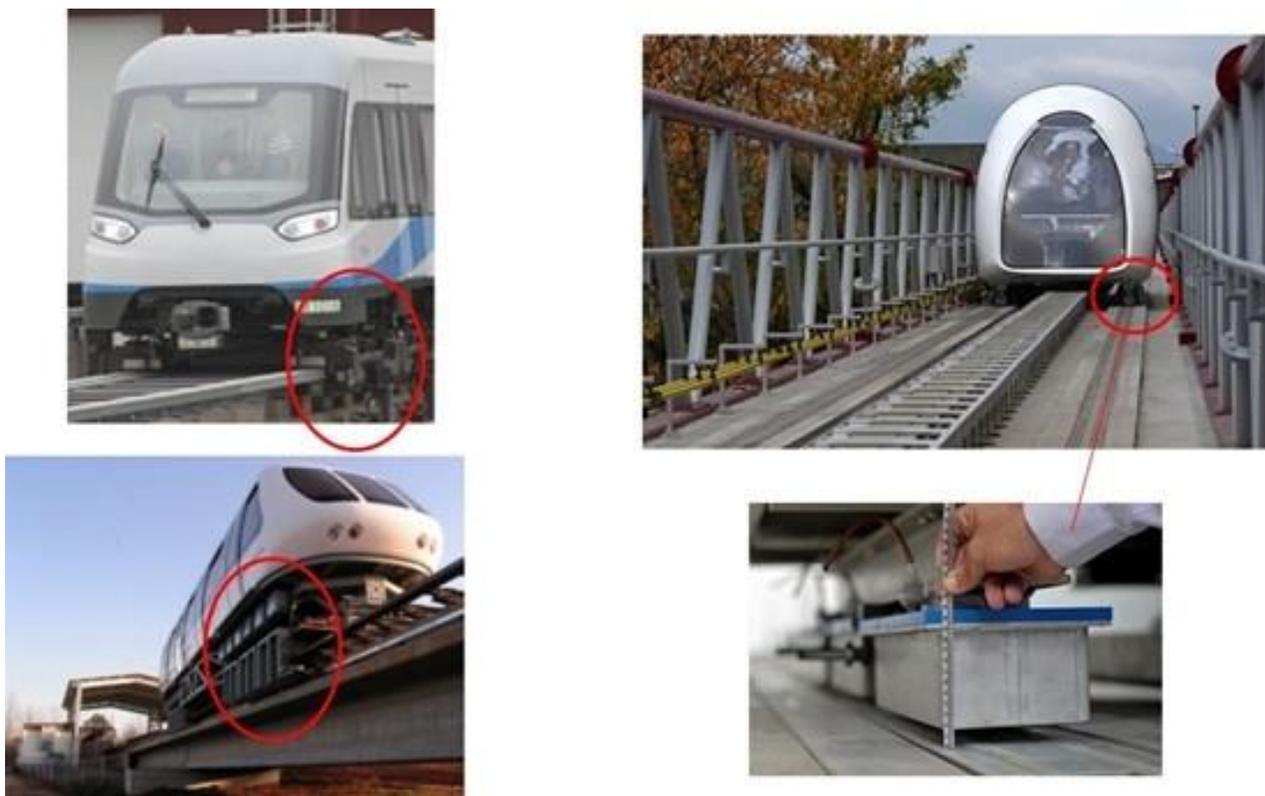


Fig. 14. The EML levitation method (two examples on the left side) in comparison with the SML levitation equipment (on the right)



Fig. 15. The EML civil engineering construction (three commercial lines) in comparison with the real scale prototype of the SML technology

## v. CONCLUSION

This paper presented the state of the art of the disruptive MagLev Technology based on flux-pinning property of superconductors in the proximity of permanent magnets, the SML method. The technology is promising. Efforts are in course to construct a test line with all characteristics of a commercial system. The sentence coined by the colleagues of KIMM (Korean Institute of Machinery and Materials) on the occasion of the 2011 MagLev conference, held in Daejeon, lends itself very well to conclude this article: MagLev trains are not just ordinary trains but wings that will help mankind take another leap forward in the future.

## ACKNOWLEDGMENT

To the China-Latin American United Laboratory for Rail Transportation and to FAPERJ/BR for the financial support. To our partners in Aerom (Alex Martinotto, Diego Abs, Eduardo Chrysostomo, Felipe Costa, João Mello, Luciano Buske, Marcus Coester, Roger Martin) and to Paulo Costa (SeaHorse), Ivan Chabu (Equacional) and Rogerio Lacerda (UFSC) for the technical support.

## REFERENCES

1. Wu MK, Ashburn J, Torng CJ, et al. Superconductivity at 93k in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. *Physical Review Letters*. 1987;58(9):908-910.
2. Murakami M, Oyama T, Fujimoto H, et al. Large levitation force due to flux pinning in Y-Ba-Cu-O superconductors fabricated by melt-powder-melt-growth process. *Japanese Journal of Applied Physic*. 1990; 29(11):1191-1194. doi:10.1143/jjap.29.1991
3. J. Wang, S. Wang, Y. Zeng, et al. The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world. *Physica C: Superconductivity*. 2002; 378-381: 809-814, doi: 10.1016/S0921-4534(02)01548-4
4. Stephan RM, Nicolsky R, Neves MA, A superconducting levitation vehicle prototype. *Physica C, Superconductivity*. 2004; 408:932-934. doi: 10.1109/tasc.2003.813017
5. Schultz L, de Haas O, Verges P, et al. IEEE transactions on applied superconductivity. *Physica C, Superconductivity*. 2005; 15(2):2301-2305. doi: 10.1109/tasc.2005.849636
6. Deng Z, Huang H, Zheng J, et al. A high temperature superconducting maglev ring test line developed in Chengdu. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2016; 26(6):3602408. doi: 10.1109/tasc.2016.2555921
7. Stephan RM, de Andrade R, Ferreira AC, Sotelo GG. Superconducting levitation applied to urban transportation. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. 2017. doi: 10.1002/047134608X.W8346
8. Deng Z, Huang H, Zheng J, et al. A high-temperature superconducting maglev-evacuated tube transport (HTS Maglev) test system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2017; 27(6):3602008. doi: 10.1109/tasc.2017.2716842
9. Stephan RM, Costa F, Rodriguez E, Deng Z. Retrospective and perspectives of the superconducting magnetic levitation technology applied to urban transportation. *Transportation Systems and Technology*. 2018; 4(3):195-202. doi: 10.17816/transsyst201843s1195-202
10. Stephan RM, de Andrade R, Ferreira AC. Superconducting light rail vehicle: A transportation solution for highly populated cities. *IEEE. Vehicular Technology Magazine*, 2012; 7(4):122-127. doi: 10.1109/mvt.2012.2218437
11. Stephan RM, Pereira A. The vital contribution of maglev vehicles for the mobility in smart cities. *MDPI – ELECTRONICS*. 2020;9(6):978-990. doi: 2079-9292/9/6/978
12. Oliveira RH, Stephan RM, Ferreira AC, Pina J. Design and innovative test of a linear induction motor for urban maglev vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2020; 56(6):6949-6956. doi: 10.1109/TIA.2020.3023066
13. Oliveira RH, Stephan RM, Ferreira AC. Optimized linear motor for urban superconducting magnetic levitation vehicles. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2020; 30(5):1-8. doi: 10.1109/TASC.2020.2976589
14. Deng Z, Zhang W, Wang L, et al. A high-speed running test platform for high-temperature superconducting maglev. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2022; 32(4):3600905. doi: 10.1109/TASC.2022.3143474
15. Deng Z, Zhang W, Kou L, et al. An ultra-high-speed maglev test rig designed for HTS pinning levitation and electrodynamic levitation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2021; 31(8):3603605. doi: 10.1109/TASC.2021.3094449

16. Li H, Deng Z, Huang H, et al. Experiments and simulations of the secondary suspension system to improve the dynamic characteristics of HTS Maglev. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2021; 31(6):3602508. doi: 10.1109/TASC.2021.3088447

**Information about the author:**

**Richard M. Stephan**, Dr.-Ing., Full Professor;

ORCID: 0000-0003-3325-4499; Scopus ID: 7103249684;

E-mail: richard@dee.ufrj.br

**Zigang Deng**, Ph.D.;

ORCID: 0000-0001-7937-9081; Researcher ID: C-4245-2008; Scopus ID: 14053713800;

E-mail: deng@swjtu.cn

**Сведения об авторе:**

**Стэфан Ричард Магдалена**, д.т.н., профессор;

ORCID: 0000-0003-3325-4499; Scopus ID: 7103249684;

E-mail: richard@dee.ufrj.br

**Зиганг Дэнг**, к.т.н.;

ORCID: 0000-0001-7937-9081; Researcher ID: C-4245-2008; Scopus ID: 14053713800;

E-mail: deng@swjtu.cn

**To cite this article:**

Stephan RM, Deng Z. Past, Present and Future of Superconducting Magnetic Levitation (SML). *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):5-19. doi: 10.17816/transsyst2023915-19

**Цитировать:**

Стэфан Р.М., Дэнг З. Прошлое, настоящее и будущее сверхпроводящей магнитной левитации // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 1. – С. 5–19. doi: 10.17816/transsyst2023915-19

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Строительные конструкции, здания и сооружения

УДК [UDC] 624.04

DOI 10.17816/transsyst20239120-33

© **К.А. Васильев, Г.А. Аверченко**

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

## ЗАМЕЧАНИЯ ПО РАЗВИТИЮ МЕТОДА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ В ОБЛАСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

В своей статье авторы подчеркивают основные принципы с точки зрения устойчивости, припоминают основные исходные предпосылки и результаты расчленения на этапах проектирования и вычисляют основные до формулирования условий надежности с точки зрения предельной восприимчивости способности и предельного состояния по отклонению к естественной эксплуатации. Далее авторы уделяют внимание различению проблем нагрузки от проблемной реакции конструкции на расчеты и теоретические и экспериментальные расчеты, требуемые для трансформации нагрузок на расчеты. Авторы подчеркивают, что сначала необходимо полностью владеть т.н. «первым значением применения» теории надежности, ограниченно выявленного использования пластических резервов, учета истории реакции, пока не выполняются предпосылки использования метода предельных оснований, основанные на высокой степени теории надежности.

*Ключевые слова:* предельное состояние, металлические конструкции, несущая способность, прочность металлоконструкций, условия надежности.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Building structures, buildings and structures

© **K.A. Vasilev, G.A. Averchenko**

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

## REMARKS ON THE DEVELOPMENT OF THE LIMIT STATE METHOD IN THE FIELD OF METAL STRUCTURES

In their article, the authors emphasize the basic principles from the point of view of sustainability, recall the basic initial prerequisites and the results of the dismemberment at the design stages and calculate the main ones before formulating the conditions of reliability from the point of view of the ultimate susceptibility of the ability and the maximum state of deviation to natural operation. Further, the authors pay attention to distinguishing between the problems of the load from the problematic reaction of the structure to calculations and

theoretical and experimental calculations required to transform loads on calculations. The authors emphasize that first it is necessary to fully own the so-called. The “first value of the application” of the theory of reliability, limitedly identified use of plastic reserves, accounting for the history of reaction, until the prerequisites for the use of the maximum foundation method based on a high degree of reliability theory are performed.

**Key words:** limit state, metal structures, bearing capacity, strength of metal structures, reliability conditions.

## ВВЕДЕНИЕ

Метод предельных состояний (далее – ПС), внедренный в области металлоконструкций около пятнадцати лет назад, в последнее время получил повышенное внимание в Чехословакии. Необходимость разобраться с различными неясностями и противоречиями в применении этого метода как с точки зрения основных правил, а также терминологии, определений и связей с областью теории нагружения или проектирования моделей, так и с точки зрения разработки спецификаций привели также к проведению конференции с международным участием и к анализу результатов работы конференции, а также последовавших дискуссий, которые кратко изложены ниже.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 1. Применение метода ПС для металлоконструкций

1.1. Вклад метода ПС. В первую очередь, основным вкладом ПС можно считать комплексное представление об общеэквивалентных условиях надежности с точки зрения различных критериев несущей способности и работоспособности, а в дальнейшем использование математическо-статистических и вероятностных моделей для формулировки этих условий. метод в отличие от ранее существовавшего метода допускаемых напряжений. Метод ПС позволяет включить в одну базовую схему как эластичную, так и пластическую конструкцию, статический и динамический отклик, ограничение эксплуатационной пригодности и т.д. [1–4].

1.2. Метод экстремальных значений. В чехословацких спецификациях настоящая интерпретация метода ПС основана на так называемом методе экстремальных значений иногда называют теорией надежности «первого уровня», характеризуемой с точки зрения несущей способности путем сравнения определенных наиболее неблагоприятные значения нагрузки-воздействия при заданной минимальной несущей способности, с точки зрения эксплуатационной пригодности путем сравнения «средней» нагрузки-воздействия со значениями, ограничивающими работоспособность и работоспособность конструкции.

Можно ожидать, что метод, основанный на экстремальных значениях, еще долго будет служить формулировке условий надежности, даже если теоретические модели надежности разрабатываются и для методов более высоких уровней. Переходу к методам более высоких уровней должно предшествовать полное овладение практически применения первого уровня в спецификациях, а также в практике проектирования в полном объеме.

1.3 Загрузка и ее последствия. Современная концепция представления данных о нагрузке в спецификациях может быть оспорена многочисленными комментариями. Если установлены предпосылки к четкой формулировке условий надежности и соответствующих критериев несущей способности и работоспособности, то в спецификации должны быть включены такие характеристики нагружения, которые вообще необходимы для определения истории воздействия нагрузки, описывающие реакцию конструкции в течение всего срока службы, а именно с точки зрения всех важнейших критериев таких как спектр диапазонов напряжений для критерия усталости [5–8]. Особое внимание следует уделить разнице между нагрузкой – явлением, независимым от конструкции, на которую она воздействует, и реакцией конструкции на нагрузку, описываемой, например, историей напряжения или деформации, ускорением или другими переменными, входящими в условия надежности с точки зрения несущей способности и работоспособности при определении размеров конструкций и их элементов.

1.4 Теоретические и экспериментальные модели. Для определения реакции конструкции необходимо использовать различные теоретические и/или экспериментальные модели. Развитие этих моделей, дающих все более точное представление о реальном поведении конструкции, вместе с совершенствованием компьютеров позволяют учитывать влияние несовершенств, неоднородностей, сложного действия нагрузки и других переменных при анализе конструкции. Однако даже самое совершенное применение модели не заменяет условия надежности в ПС грузоподъемности или работоспособности.

Модели позволяют определить лишь те характеристики реакции, которые входят в индивидуальные условия в соответствии с их содержанием. Необходимо следить за тем, чтобы уровень расчетных моделей соответствовал уровню входных переменных и предпосылок.

## 2. ПС грузоподъемности

2.1 В целом. В отношении ПС несущей способности конструкция должна быть спроектирована и оценена таким образом, чтобы она была способна выдерживать установленные наиболее неблагоприятные воздействия нагрузки, не теряя при этом своей способности надлежащим образом выполнять свою функцию в течение требуемого срока службы. Определения наиболее неблагоприятных значений воздействия нагрузки, а

также определения минимальной несущей способности основаны либо на статистическом анализе рассматриваемых случайных величин для выбранного квантиля, либо на полувероятностном подходе и, возможно, на детерминистическом подходе квалифицированная оценка, соответствующая опыту, и т.д. По мере расширения знаний о случайных величинах, приведенные определения должны выводиться с возрастающей точностью в соответствии с теорией надежности.

ПС грузоподъемности исследуют по характеру отдельных условий надежности по установленным наиболее неблагоприятным последствиям нагружения, выраженным, например, предельной величиной напряжения или деформации, диапазоном напряжений спектр и др. (Табл. 1).

С учетом характера достижения несущей способности металлоконструкций, отдельных условий надежности и критериев их можно включить в основные группы, определенные в чехословацких технических условиях, действующих в целом для всех строительных конструкций. Проектируемое сооружение должно удовлетворять всем в общем равнозначным условиям несущей способности, причем не всегда заранее ясно в процессе определения размеров, какое из условий будет решающим для расчета сооружения [9–11].

В следующем тексте ПС несущей способности разбиты на группы, при этом постоянно подчеркивается специфика отдельных условий и критериев, действующих для металлоконструкций. Различие между отдельными условиями надежности состоит, с одной стороны, в механизме достижения несущей способности, с другой - в характеристиках реакции конструкции на нагрузки, которые необходимо вводить в условия надежности.

2.2 Стабильность положения (Табл. 1, СС-I). Условие устойчивости положения служит для обеспечения надежности конструкции, ее элементов от опрокидывания, подъема или смещения в опорах и т.п.

В современных случаях этот ПС оценивается в первую очередь для экстремальных значений воздействия нагрузки, а именно с точки зрения как максимальных, так и минимальных значений.

2.3 Прочность (Табл. 1, СС-II). Несущая способность определяется в случае прочностного критерия по отношению либо к теории первого порядка - простая прочность, либо к теории второго порядка - прочность устойчивости (и ко всем другим задачам, рассматривающим равновесие на деформируемой конструктивной системе). Далее - можно рассмотреть упругий, а также упругопластический диапазон структурной реакции.

2.3.1 Простая прочность (Табл. 1, СС-IIa). Оценка простой прочности основана на определении такого уровня расчетной несущей способности, при котором исключается не только полное разрушение с заданными экстремальными воздействиями нагрузки при работе (разрушение растяжного стержня, стыка и т.п.), но и возникновение такие постоянные

или полные упруго-пластические деформации, которые следует рассматривать как неприемлемые в отношении долговременной работы конструкции. Здесь речь идет об оценке критериев, отличных от критериев деформации в группе предельных состояний работоспособности.

2.3.2 «Устойчивая» (теория второго порядка) прочность (Табл. 1, СС-Па). Долгое время явления устойчивости рассматривались как самостоятельные ПС - в исходном виде их сущности объектом рассмотрения была «идеальная» конструкция без исходных геометрических или физических несовершенств, а несущая способность выводилась из нагрузки при возникновении, бифуркации равновесия. Следование реальным структурам, а также лабораторная проверка и улучшение исходных предпосылок неизбежно привели к признанию противоречия между приведенным выше идеализированным понятием стабильности и реальным поведением. Одной из основных причин противоречия является неизбежное наличие начальных несовершенств, сменивших явление внезапного прогиба постепенным более или менее монотонным нарастанием деформации стержней или пластин/стенок, поясов, оболочек/ с самого начала нагружения. Тогда тип разрушения очень похож на тип разрушения при достижении простой прочности, но разница заключается в скорости деформации. ПС отождествляют с достижением расчетной прочности в наиболее подверженном воздействию месте и/или с достижением допустимых упругих или упругопластических деформаций местных или полных, при этом в расчете необходимо использовать теорию второго порядка.

«Стойкость устойчивости» обычно связывают с экстремальным значением монотонно возрастающей нагрузки, что, однако, не имеет общего характера, особенно при динамическом отклике.

2.4 Инкрементальное обрушение (Табл. 1, СС-III). При использовании пластических резервов несущая способность может быть связана с превышением допустимых остаточных деформаций в случаях, когда критерий приспособляемости не выполняется. Именно увеличение упругопластических деформаций по критерию прочности соответствует истории нагружения.

2.5 Малоцикловая усталость (Табл. 1, СС-IV). В тех случаях, когда истории нагружения соответствуют пластические инверсии в отдельных частях конструкции, необходимо оценивать состояние надежности с точки зрения малоцикловой усталости. Отклик на нагрузку должен выражаться числом и величиной пластических реверсий за весь срок службы, а критерием является прочность при малоцикловой усталости, определяемая в данном случае для конкретного материала допустимым числом циклов альтернативной пластификации, определенной степени, например, согласно закону Мэнсона-Коффина.

2.6. Многоцикловая усталость (Табл. 1, СС-V). В случае значительного временного отклика кумуляция усталостных повреждений в основном связана с зарождением и распространением усталостных трещин. Условие надежности с точки зрения многоцикловой усталости включает в себя характеристики отклика, выраженные, например, спектром напряжений в исследуемой местности за время жизни конструкции. Наиболее неблагоприятные эффекты нагрузки определяются крайними значениями реакции, такими как «экстремальный спектр». Критерий не зависит от расчетной прочности материала, а основан на зависимости для многоцикловой усталости, определяемой, например, кривыми S–N, установленными по результатам эксперимента для выбранного квантиля [12–14]. Связь между характеристикой наиболее неблагоприятного отклика и прочностью при многоцикловой усталости должна выражаться в зависимости от решающих переменных с точки зрения механизмов кумуляции усталостных повреждений, различающихся, например, в стальных канатах, композитных профили, тонкостенные профили и др.

2.7 Хрупкое разрушение (Табл. 1, СС-VI). В районе строительных конструкций зданий, мостов и т.п. появляются повреждения в виде хрупкого разрушения; элемент поврежден быстро распространяющейся трещиной без предварительного предупреждения. ПС повреждения через разрушение оценивается условием надежности, которое включает, с одной стороны, реакцию на нагружение, выраженную напряжениями, скоростью нагружения, температурой и т. д., с другой – свойства материала, дефекты и другие несовершенства конструкции. конструкция, остаточные напряжения и т.д. Хрупкое разрушение может появиться даже при очень малой нагрузке по сравнению с критерием прочности.

2.8 Дополнительные примечания (Табл. 1, СС-VII). Приведенное выше перечисление ПС в общем случае не является полным.

Значительное снижение надежности может происходить и при сочетании перечисленных выше отдельных условий - например, элемент конструкции удовлетворяет как условию малоцикловой усталости, так и условию многоцикловой усталости, но два соответствующих вида повреждения не являются независимыми: альтернативные пластификации может значительно ускорить разрушение от многоцикловой усталости. Аналогичным образом риск повреждения может значительно возрасти в конструкциях, подвергающихся одновременно многоцикловой усталости и напряжению, приводящему к хрупкому разрушению.

В металлических конструкциях реологические свойства материала обычно выражены слабо. Лишь в некоторых случаях (сталь при более высоких температурах, составные железобетонные конструкции, соединения трения и т. д.) необходимо учитывать зависимость деформации от времени и соответствующую предысторию.

2.9 Характеристики нагрузки и реакции. В Табл. 1 четко представлены характеристики нагрузки и отклика, необходимые для оценки переносимости в соответствии с индивидуальными условиями от СС-1 до СС-VII. Существующее расположение значений и данных по нагрузке, касается прежде всего условия прочности СС-I. Убедиться, что нормативы нагружения соответствуют комплексности условий надежности по Табл. 1, необходимо постепенно дополнять эти спецификации данными, которые (при использовании соответствующих теоретических или экспериментальных моделей) позволяют определить характеристики отклика, необходимые для проверки условий надежности от СС-I до СС-VII.

### 3. ПС исправности

3.1 В целом. Металлоконструкции должны быть спроектированы таким образом, чтобы выдерживать не только нагрузки по ПС несущей способности (см. раздел 2), но и удовлетворять требованиям эксплуатации и работоспособности при обычных эксплуатационных нагрузках и их воздействиях. Некоторые ограничения работоспособности в отношении комфорта человека, работы механизмов и т. д. уже включены в технические условия. В качестве критериев рассматриваются допустимые ускорения, деформации, повороты и т. д.

Понятно, что в группе ПС работоспособности эффекты нагружения оцениваются иначе, чем эффекты, заложенные в условия надежности с точки зрения несущей способности. Приведем краткую характеристику условий надежности с точки зрения работоспособности металлических конструкций.

3.2 Классификация ПС по исправности. В Табл. 2 представлены основные группы ПС по эксплуатационной пригодности, общие для всех металлоконструкций. Добавлена группа SA-V, относящаяся к шуму, создаваемому работой конструкции.

Необходимо подчеркнуть, что определение входных воздействий нагружения и критериев при формулировке условий надежности по работоспособности конструкции в общем случае весьма индивидуально - оно зависит от функции, назначения, требований пользователя, защиты от повреждения технологического оборудования и т.д. - и поэтому соответствующие нормы в проектных заданиях могут быть сформулированы лишь частично качественно и количественно.

В Табл. 2 условия надежности по работоспособности классифицированы на группы по влиянию на комфорт человека, на здание, машины или другое технологическое оборудование.

3.3 Загрузка и отклик с точки зрения удобства обслуживания. В качестве репрезентативных эффектов нагружения по отношению к ПС работоспособности часто упрощенно рассматривают эффекты нагрузки (отклика), соответствующие «средней» рабочей нагрузке. Как правило,

необходимо предусмотреть взаимосвязь между нагрузкой и фактическим критерием работоспособности в рамках конкретного проекта (например, по согласованию с пользователем), так как «текущая» эксплуатационная нагрузка и соответствующие эффекты могут в отношении функциональных требований соответствовать интенсивности нагрузки, значительно отличающейся от рабочей нагрузки. Заметим, что сама рабочая нагрузка в расчет не входит, для определения размеров следует использовать расчетные значения, с одной стороны по условиям грузоподъемности, а с другой стороны по эксплуатационной пригодности, где временно обычно предписывается коэффициент нагрузки 1,0. Однако это значение может быть постепенно заменено в будущем значениями меньше или больше 1,0, в соответствии с характером дела.

#### 3.4 Условия надежности (Табл. 2).

##### 3.4.1 *Комфорт человека (SA-I, SA-V);*

Критерии делятся:

- по допустимому ускорению движения, выражающему допустимую динамическую реакцию на нагрузку (горизонтальная и вертикальная вибрация и др.);
- по допустимой деформации (эстетический и психологический эффект);
- по допустимому уровню шума, создаваемого работающей конструкцией, и т.д.

Некоторые критерии представлены, например, в гигиенических нормативах, в стандартах на проектирование металлоконструкций; часто предельные значения должны устанавливаться разработчиком по согласованию с пользователем, разработчиком оборудования и т. д.;

3.4.2 *Защита от повреждения строительного оборудования (SA-II).* Воздействие нагрузки не должно вызывать повреждений перегородок, стекол, потолков и других частей здания, при этом необходимо учитывать текущие неблагоприятные статические, а также динамические воздействия нагрузки и адекватно сформулированные критерии;

3.4.3 *Эксплуатация технологического, машинного и др. оборудования сооружения (SA-III).* Текущие эксплуатационные воздействия, как статические, так и динамические, не должны достигать таких значений, которые могут нарушить работу и функционирование оборудования, поддерживаемого конструкцией.

Предел статических деформаций, а также динамического отклика должен определяться разработчиком оборудования и/или пользователем в отношении чувствительности, безотказности и т. д. При формулировке условия надежности в отношении работоспособности следует необходимо учитывать временное использование сооружения (постоянное или эпизодическое, служебное и т. д.);

3.4.4 *Газонепроницаемость и водонепроницаемость (SA-IV)*. В бассейнах, корпусах реакторов и т. п. работоспособность может зависеть от герметичности винтовых, заклепочных или сварных соединений и/или от конструктивного расположения деталей. При оценке необходимо принять во внимание, какие последствия нагрузки должны быть подтверждены критериями газо- или водонепроницаемости [15];

3.4.5 *Снижение шума (SA-V)*. Условие эксплуатационной пригодности с точки зрения шума, создаваемого работающей конструкцией, может применяться, например, в случае мостов с коробчатыми балками в городских районах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С точки зрения дальнейшего развития метода ПС металлоконструкций можно выделить следующие выводы:

**Тип вероятностного метода.** Можно сделать вывод, что применительно к развитию и особенно к практическим применениям метода ПС в области металлоконструкций методика проектирования и оценки еще долгое время будет основываться на так называемой теории надежности первого уровня, т.е. по методу экстремальных значений. Этот метод должен быть разработан в отношении всей комплексной системы условий надежности и критериев как несущей способности, так и работоспособности, прежде чем можно будет ввести в стандарты теорию надежности более высокого уровня.

**Загрузка и реакция.** Условия надежности с точки зрения ПС несущей способности, а также работоспособности включают, вообще говоря, значения и характеристики реакции конструкции на нагрузку, выраженные в истории напряжения или деформации, в ускорении и т.д. Величины нагрузки - явления, вообще не зависящего от конструкции, на которую она действует, - вообще говоря, не включаются в определение размеров и оценку напрямую, а только через теоретические или экспериментальные модели, позволяющие определять статический или динамический и упругий или упруго-пластический отклик. Спецификации в отношении нагрузки и проектирования конструкций должны постепенно дополняться данными, информацией и значениями, необходимыми для определения реакции с точки зрения всех критических условий несущей способности и эксплуатационной пригодности (Табл. 1, 2).

**Условия надежности.** При определении размеров металлоконструкций должен быть обеспечен комплекс эквивалентных условий надежности по несущей способности и эксплуатационной пригодности. По характеру достижения несущей способности в металлоконструкциях можно указать основные условия надежности,

представленные в Табл. 1. Аналогично можно классифицировать условия надежности по показателям работоспособности (Табл. 2).

Задача проектировщика состоит в том, чтобы учесть весь набор условий и достичь условий, имеющих решающее значение для определения размеров, путем исключения.

При дальнейшей разработке норм, правил и т.п. на проектирование металлоконструкций, в том числе нормативов нагружения, комплекс условий и критериев, представленных в Табл. 1, 2 следует учитывать.

**Применение теории надежности.** При определении наиболее неблагоприятных воздействий нагрузки и минимальной грузоподъемности с точки зрения ПС грузоподъемности, а также средних воздействий нагрузки и критериев с точки зрения ПС работоспособности следует руководствоваться теорией вероятностей, статистикой и т. д. все больше занятых. Из-за сложности затрагиваемых проблем, отсутствия данных и т. д. определения все еще часто основаны на детерминированной оценке, на опыте и т. д. По мере совершенствования методов проектирования и соответствующих спецификаций необходимо дополнять информацию на критических случайных величинах после соответствующего анализа.

Таблица 1. Предельные состояния несущей способности и соответствующие условия надежности

Предельные состояния	Индикация	Описание загрузки	Условия надежности по грузоподъемности	
			Описание ответа	Критерий грузоподъемности
Стабильность положения	СС-I	Экстремальное (самое высокое и самое низкое) значение	Экстремальные эффекты (самый высокий и самый низкий)	Безопасность (> 1,0) от потери устойчивости положения
Прочность	СС-Па СС-Пб	Экстремальные значения нагрузки с учетом их одновременного возникновения, динамической реакции конструкции и т.п.	Напряжения или деформации, соответствующие экстремальным нагрузкам, включая динамическую реакцию и т. д.	Расчетная прочность, допускаемые местные или полные деформации, допускаемые относительные пластические деформации и др.
Встряска	СС-III	История загрузки, в том числе предельные значения нагрузок	История упругопластических деформаций, соответствующая истории нагружения	встряска критерий
Малоциклова	СС-IV	История из	Количество и	Критерий

Предельные состояния	Индикация	Описание загрузки	Условия надежности по грузоподъемности	
			Описание ответа	Критерий грузоподъемности
я усталость		загрузки	ассортимент пластиковых разворотов	Мэнсона-Гроба, Серенсена и др .
Многоцикловая усталость	СС-V	История из загрузки	Спектр диапазонов напряжений и т. д.	S – N кривые и т.д.
Хрупкое разрушение	СС-VI	Экстремальные значения, скорость загрузки, окружающая среда и т. д.	Стресс, скорость загрузки и реакция, температура и т. д.	Расчетное значение $K_{IC}$ для данного материала и т. д.
Комбинации	СС-VII	Что касается частного случая	По частному случаю	

Таблица 2. Предельные состояния и условия надежности в отношении работоспособности металлоконструкций

Условия надежности по предельным состояниям работоспособности металлических конструкций			
Индикация	Требование	Эффекты нагрузки	Критерий
СА-I	Человеческий комфорт	Эффекты «средней» нагрузки (или нагрузки, соответствующей обычной требуемой функции), характеризующиеся деформацией, ускорением и т. д.	Допустимая деформация, допустимое ускорение и т. д.
СА-II	Сокращение или ограничение ущерба от строительных добавок		
СА-III	Обеспечение требуемой работы машин, технологического и др. оборудования		
СА-IV	Газонепроницаемость и водонепроницаемость	Индивидуально в зависимости от характера конструкции и условий эксплуатации см. Гигиенические правила	
СА-V	Ограничение шума, вызванного работой конструкции		

## РЕКОМЕНДАЦИЯ К ПЕЧАТИ

Кандидат военных наук, доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого Алексеев Сергей Викторович рекомендует статью Васильева К.А., Аверченко Г.А. «Замечания по развитию метода предельных состояний в области металлических конструкций» к публикации.

**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. Юшков В.С., Кычкин В.И., Бармин Н.Д. Реализация диагностики и ремонта мостовых сооружений // Вестник МГСУ. – 2016. – № 6. – С. 118–125. [Yushkov VS, Kuchkin VI, Barmin ND. Realizaciya diagnostiki i remonta mostovykh sooruzhenij. *Vestnik MGSU*. 2016;(6):118-125. (In Russ.)]. Ссылка активна на 27.02.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26210458>
2. Зубко О. В. Виды предельных состояний металлических сварных конструкций при эксплуатации при проведении экспертизы промышленной безопасности // Проблемы современной науки и образования. – 2015. – № 10(40). – С. 46-49. [Zubko O. V. Types of limit states of metal welded structures during operation during the examination of industrial safety. *Problems of modern science and education*. 2015;10(40):46-49. (In Russ.)]. Ссылка активна на 27.02.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24238808>
3. Редькин А.Н. Определение надежности металлических конструкций при ограниченной информации по критерию несущей способности // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 4(33). – С. 274-280. [Redkin AN. Determination of the reliability of metal structures with limited information according to the criterion of bearing capacity. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2012;4(33):274-280. (In Russ.)]. Ссылка активна на 27.02.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18793396>
4. Аверченко Г.А., Баланин А.П., Борисов В.А., и др. Использование жесткой нити в качестве несущего элемента покрытий больших пролетов / В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. – 2021. – С. 227–229. [Averchenko GA, Balanin AP, Borisov VA, et al. Ispol'zovanie zhestkoj niti v kachestve nesushhego jelementa pokrytij bol'shix proletov. V sbornike: Nedelja nauki ISI. Materialy vsersosijskoj konferencii v 3-h chastjah. Inzhenerno-stroitel'nyj institut Sankt-Peterburgskogo politehnicheskogo universiteta Petra Velikogo. 2021:227-229. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46294823>
5. Черных А.Г. Методы исследования соединений деревянных конструкций на когтевых шпонках // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – С. 150. [Chernykh AG. Methods for studying the joints of wooden structures on claw dowels. *Modern problems of science and education*. 2013;(2):150. (In Russ.)]. Ссылка активна на 27.02.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21285503>
6. Соколов С.А. Методика прогнозирования разрушения сварных металлических конструкций подъемно-транспортных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2015. – № 12. – С. 22-28. [Sokolov SA, Plotnikov DG. The method of predicting the destruction of welded metal structures of lifting and transport machines. *Repair. Recovery. Modernization*. 2015;(12):22-28. (In Russ.)]. Ссылка активна на 27.02.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25097248>
7. Луцко Т.В. Введение норм на проектирование и расчет крановых металлоконструкций // Современное промышленное и гражданское

- строительство. – 2006. – Т. 2, № 1. – С. 39-42. [Lutsko TV. Introduction of norms for the design and calculation of crane metal structures. *Modern industrial and civil construction*. 2006;2(1):39-42. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13088910>
8. Шутова М.Н., Евтушенко С.И., Гонтаренко Б.А., и др. Оценка технического состояния поврежденных металлических элементов конструкций / В сборнике: Современное оборудование, методы инструментального обследования и усиления зданий и сооружений: Сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции, Краснодар. – 2019. – С. 88–101. [Shutova MN, Evtushenko SI, Gontarenko BA, et al. Assessment of the technical condition of damaged metal structural elements / In the collection: Modern equipment, methods of instrumental inspection and strengthening of buildings and structures: Collection of scientific articles on Materials of the International Scientific and Practical Conference, Krasnodar. 2019:88-101. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38568482>
  9. Югов А.М. Оценка несовершенств строительных металлических конструкций на основе теории нечетких множеств // Металлические конструкции. – 2008. – Т. 14, № 1. – С. 43-51. [Yugov AM. Estimation of imperfections of building metal structures based on the theory of fuzzy sets. *Metal constructions*. 2008;14(1):43-51. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13050069> Ссылка активна на: 27.02.2023.
  10. Гулаков В.С., Шушляков Р.С., Аверченко Г.А., и др. Снижение материалоемкости несущих конструкций временных сооружений для транспортного строительства / В сборнике: Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 04–10 апреля 2022 года. Том Часть 2. – 2022. – С. 5–7. [Gulakov VS, Shushlyakov RS, Averchenko GA, et al. Reducing the material consumption of load-bearing structures of temporary structures for transport construction. In the collection: ISI Science Week: Collection of materials of the All-Russian Conference, St. Petersburg. 2022:5-7. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48731847&pff=1>
  11. Зорина Е.А., Ким Д.У., Аверченко Г.А., Уколов С.А. Устойчивость конструкций автодорожных и железнодорожных мостов при вынужденных колебаниях стержневых систем // Путь навигатор. – 2021. – № 47(73). – С. 39–47. [Zorina EA, Kim DU, Averchenko GA, Ukolov SA. Ustojchivost' konstrukcij avtodorozhnyh i zheleznodorozhnyh mostov pri vynuzhdennyh kolebanijah sterzhnevyyh sistem. *Path Navigator*. 2021;(47(73)):39-47. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46208591>
  12. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В. Разработка перспективных (гибридных) конструкций пролетных строений мостов из сталей различной прочности // Вестник ТГАСУ. – 2017. – № 3. – 67 с. [Kartopol'cev VM, Kartopol'cev AV. Hybrid design of bridge span structures made of different strength steel. *Vestnik TGASU*. 2017;(3):67. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29345496>
  13. Алексеев С.В., Шевченко С.М., Трифонова А.А. Выявление наиболее надежных конструкций деформационных швов // Путь навигатор. – 2021. – № 46(72). – С. 36–43. [Alekseev SV, Shevchenko SM, Trifonova AA. Vyjavlenie naibolee nadezhnyh konstrukcij deformacionnyh shvov. *Path Navigator*. 2021;(46(72)):36-43. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45154681> Ссылка активна на: 27.02.2023.

14. Марутян А.С. Разработка и исследование управляемых металлических конструкций нового поколения // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – № 5(238). – С. 75–83. [Marutyán AS. Development and study of controlled metal structures of a new generation. *Structural mechanics and calculation of structures*. 2011;(5(238)):75-83. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17088365>
15. Шульгин В.Н. Несущая способность и расчет металлических балок // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2009. – № 3. – С. 11–17. [Shulgin VN. Bearing capacity and calculation of metal beams. *Fires and emergencies: prevention, liquidation*. 2009;(3):11-17. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.02.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16341933>

**Сведения об авторах:**

**Васильев Кирилл Андреевич**, магистрант, Инженерно-строительный институт;  
eLibrary SPIN: 8250-4609; ORCID: 0000-0002-1013-2029;  
E-mail: vkirill99@yandex.ru

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

**Information about the authors:**

**Kirill A. Vasilev**, master's degree student;  
eLibrary SPIN: 8250-4609; ORCID: 0000-0002-1013-2029;  
E-mail: vkirill99@yandex.ru

**Gleb A. Averchenko**, assistant;  
eLibrary SPIN: 1707-9958; ORCID: 0000-0001-8813-545X;  
E-mail: averchenko\_ga@spbstu.ru

**Цитировать:**

Васильев К.А., Аверченко Г.А. Замечания по развитию метода предельных состояний в области металлических конструкций // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 1. – С. 20–33. doi: 10.17816/transsyst20239120-33

**To cite this article:**

Vasilev KA, Averchenko GA. Remarks on the development of the limit state method in the field of metal structures. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):20-33. doi: 10.17816/transsyst20239120-33

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

УДК [UDC] 551.583.2

DOI 10.17816/transsyst20239134-43

© **Р.Г. Ахтямов**

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

## РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К АДАПТАЦИИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ К КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ

**Цель:** Разработка подхода к адаптации транспортной инфраструктуры к будущим климатическим изменениям.

**Материалы и методы:** Методом исследования являлся анализ подходов по адаптации к изменению климата, программ действий по адаптации к изменению климата, а также планов адаптации на местном, региональном и отраслевом уровне.

**Результаты:** Предлагаемый подход состоит из стратегии адаптации и плана реализации стратегии адаптации с целью включения мероприятий по адаптации к изменению климата в существующие процедуры управления отраслью. Итогом разработки подходов к адаптации транспортной отрасли к климатическим изменениям должна стать стратегия и план адаптации.

**Заключение:** Итеративная структура позволяет корректировать мероприятия по адаптации с учетом уточнения прогнозов изменения климата, социально-экономических и технологических изменений. Предлагаемый подход позволяет определить степень готовности отрасли к адаптации и совершенствовать меры адаптации.

**Ключевые слова:** адаптация к изменению климата; природные стихийные явления; стратегия адаптации; план адаптации; устойчивость; управление рисками; изменение климата

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Ground transport and logistics facilities and complexes

© **Rasul G. Akhtyamov**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

(St. Petersburg, Russia)

## DEVELOPMENT OF APPROACHES FOR TRANSPORT INFRASTRUCTURE ADAPTATION TO CLIMATIC CHANGE

**Aim:** Development of transport infrastructure adaptation for climatic change.

**Materials and Methods:** The research method was the analysis of climate change adaptation approaches, climate change adaptation action programs, and adaptation plans at the local, regional and sectoral levels.

**Results:** The proposed approach consists of an adaptation strategy and an implementation plan for the adaptation strategy to integrate climate change adaptation activities into existing management. The outcome of the development of approaches to the adaptation of the transport industry to climate change should be an adaptation strategy and plan.

**Conclusion:** The iterative structure makes it possible to adjust adaptation measures, taking into account the refinement of climate change forecasts, socio-economic and technological changes. The proposed approach allows to determine the level of industry adaptation readiness for adaptation measures improving.

**Key words:** *climate change adaptation; natural disasters; adaptation strategy; adaptation plan; sustainable development; risk management; climate change*

## ВВЕДЕНИЕ

Глобальный климат меняется [1], увеличивается частота экстремальных погодных явлений [2–4]. Природные стихийные явления могут привести к повреждению и нарушению работы транспортной инфраструктуры. Проливные дожди и последующие оползни или наводнения могут привести к невозможности функционирования железных дорог [5]. Высокие температуры могут привести к нарушению функционирования железнодорожной инфраструктуры, вызывая коробление пути, провисание воздушных линий, выход из строя электрооборудования, а также приводить к задержкам, вследствие ограничений скорости для снижения вероятности схода подвижного состава с рельс [7–11].

Поскольку расчетный срок службы транспортной инфраструктуры часто составляет несколько десятилетий, при установке новых объектов следует учитывать особенности будущего климата, чтобы избежать снижения надежности инфраструктуры или дорогостоящей модернизации. Существующая инфраструктура может потребовать мер по адаптации в ответ на изменяющиеся климатические риски.

В этой связи целесообразна разработка стратегии адаптации и плана реализации стратегии адаптации к изменению климата с последующей интеграцией в существующие процедуры управления отраслью.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой проведенного исследования стал анализ подходов по адаптации транспортной инфраструктуры к изменению климата, сформулированных на основании оценки динамики изменения климата [12–14] и оценка последствий крупномасштабных чрезвычайные ситуации природного характера (циклоны Тауктае и Яас, Индия, 2021; наводнение в

провинции Хэнань, тайфуна Ин-фа, Китай, 2021, землетрясения в Турции и Сирии, 2023).

Также использованы документы локальных уровней, в которых отражены отраслевые инициативы: руководство по адаптации к изменению климата для портов и внутренних водных путей (PIANC, Всемирная ассоциация водной транспортной инфраструктуры); руководство по адаптации к изменению климата с сокращением выбросов парниковых газов от транспорта (PIARC, Всемирная ассоциация автомобильных дорог); развитие транспортной системы России с трансформацией в низкоуглеродную отрасль, посредством ускоренного внедрения новых технологий (Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [13]).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Итогом разработки подходов к адаптации транспортной отрасли к климатическим изменениям должна стать стратегия и план адаптации. Планы адаптации к изменению климата должны учитывать изменения в частоте и масштабах природных стихийных явлений, а также долгосрочные климатические, социально-экономические и технологические изменения. Подходы к планированию адаптации, как правило, основаны на анализе затрат и результатов отдельных управляющих воздействий, при этом они имеют ограниченный потенциал использования в условиях медленно происходящих изменений климатической системы, особенно в сочетании со сложными техническими системами, включающими долговечные объекты инфраструктуры (мосты, тоннели) с объектами с коротким жизненным циклом (цифровые системы). Предлагаемые пути адаптации подразумевают поэтапный и итеративный подход, состоящий из последовательных действий, которые реализуются на основе изменений климатических рисков, при этом данные действия не ставят под угрозу возможность дальнейшего развития отрасли. Однако, при разработке сценариев и путей адаптации необходимо предусматривать возможную задержку в принятии решений из-за значительной неопределенности в прогнозах места и степени реализации конкретного климатического риска.

Вследствие того, что объекты транспортной инфраструктуры сложны и взаимосвязаны, имеют различный возраст и срок службы, а также вследствие постоянного развития инженерных транспортных систем адаптивное управление климатическими рисками на транспорте требует различных подходов и методов, с помощью которых можно оценить как их эффективность, так и очередность этапов.

Концепция итеративного подхода, основанного на оценке рисков, при котором мероприятия планируются, реализуются, контролируются и

оцениваются как отправная точка для следующего этапа планирования действий в настоящее время получает широкое распространение благодаря разработкам стратегий адаптации как транспортных предприятий отдельных стран, так различных международных организаций.

Чтобы меры по адаптации к изменению климата стали частью процесса управления, они должны включать научно-обоснованные сведения об изменениях климата и реализовываться параллельно с существующими процедурами управления отраслью. Для этого требуется эффективная двусторонняя связь между исследователями и заинтересованными сторонами в транспортной отрасли.

Кроме того, заинтересованные стороны в транспортной отрасли должны иметь представление о климатических рисках по отношению к объектам транспортной инфраструктуры, а также о способах снижения риска и факторах неопределенности [15–18]. Например, прогнозы изменения климата предполагают увеличение частоты и продолжительности периодов волн жара, что может привести к увеличению задержек при железнодорожных перевозках, связанных с короблением пути и отказами технических систем, но точное место и время достижения критической температуры неизвестно.

Для корректной оценки путей взаимодействия по адаптации к изменениям климата целесообразен учет двух аспектов:

- стратегические направления развития отрасли;
- инженерно-технические вопросы, лежащие в основе повышения устойчивости отрасли путем адаптации, как существующих систем, так и вновь проектируемых и строящихся систем.

При этом необходимо исходить из следующих принципов:

- любое мероприятие должно основываться на существующих проектах, процессах, стандартах, лишь дополняя их. Например, необходимо выстраивать связи между программами по адаптации и мероприятиями по сокращению выбросов парниковых газов, что расширяет возможности реагирования на изменения прогнозов, а также делает более управляемыми риски в области безопасности;

- специалисты, которым предстоит реализовывать мероприятия по адаптации должны обладать актуальными знаниями и/или опытом, которые потребуются для адаптации к изменению климата. В таком случае специалисты окажут поддержку в принятии решений (аналогично процедурам HAZID, HAZOP), а их участие обеспечит широкое принятие исполнителями мер по адаптации;

- процесс адаптации к изменению климата должен быть гибким и итеративным. Стратегия адаптации и план реализации стратегии должны иметь возможность включать новую информацию и опыт, а также быть

готовым к новым вызовам, которые возникнут в связи с реализацией плана адаптации.

Подготовка объектов транспортной инфраструктуры к изменению климата должно быть основано на современных знаниях о процессе изменения климата, передовой международной практике и академических исследованиях. Данная подготовка может состоять из двух разделов:

- разработка стратегии адаптации к изменению климата;
- разработка плана реализации стратегии адаптации к изменению климата.

При разработке данных разделов необходимо учитывать, что возможна стагнация в процессе реализации стратегии адаптации в случае существенной разницы между целями стратегии и мерами по адаптации с имеющимися возможностями отрасли.

Таким образом, цель стратегии адаптации к изменению климата состоит в том, чтобы путем расстановки акцентов на конкретных мероприятиях для конкретных объектов транспортной инфраструктуры установить количественные параметры, в том числе временные, в которых они должны быть реализованы, с учетом приоритетных климатических рисков.

Схема формирования стратегии адаптации, а также плана реализации стратегии адаптации к изменению климата, на основе вышеприведенных подходов приведена на Рис.

Как видно из Рис., формирование стратегии адаптации начинается с определения общих целей. Потенциально они могут включать существующие производственные цели, но рассматриваться в контексте адаптации к изменению климата. Например, цель может состоять в том, чтобы поддерживать текущие характеристики во время неблагоприятных погодных условий. Далее, определяя различные способы, которыми природные стихийные явления (проливные дожди, ураганы и др.) или долгосрочные климатические изменения (повышение температуры, таяние вечной мерзлоты) могут повлиять на транспортную систему, включая изменение видов опасностей, уязвимостей и последствий (экономические, социальные и экологические). Сведения о климатических изменениях поступает от государственных метеорологических служб или глобальных проектов, таких как Межправительственная группа экспертов по изменению климата.

Далее происходит выявление уязвимых мест транспортной инфраструктуры при реализации климатических рисков. На этом этапе также определяется, достаточно ли информации для выявления уязвимых мест (с течением времени данные обновляются на новых итерациях).

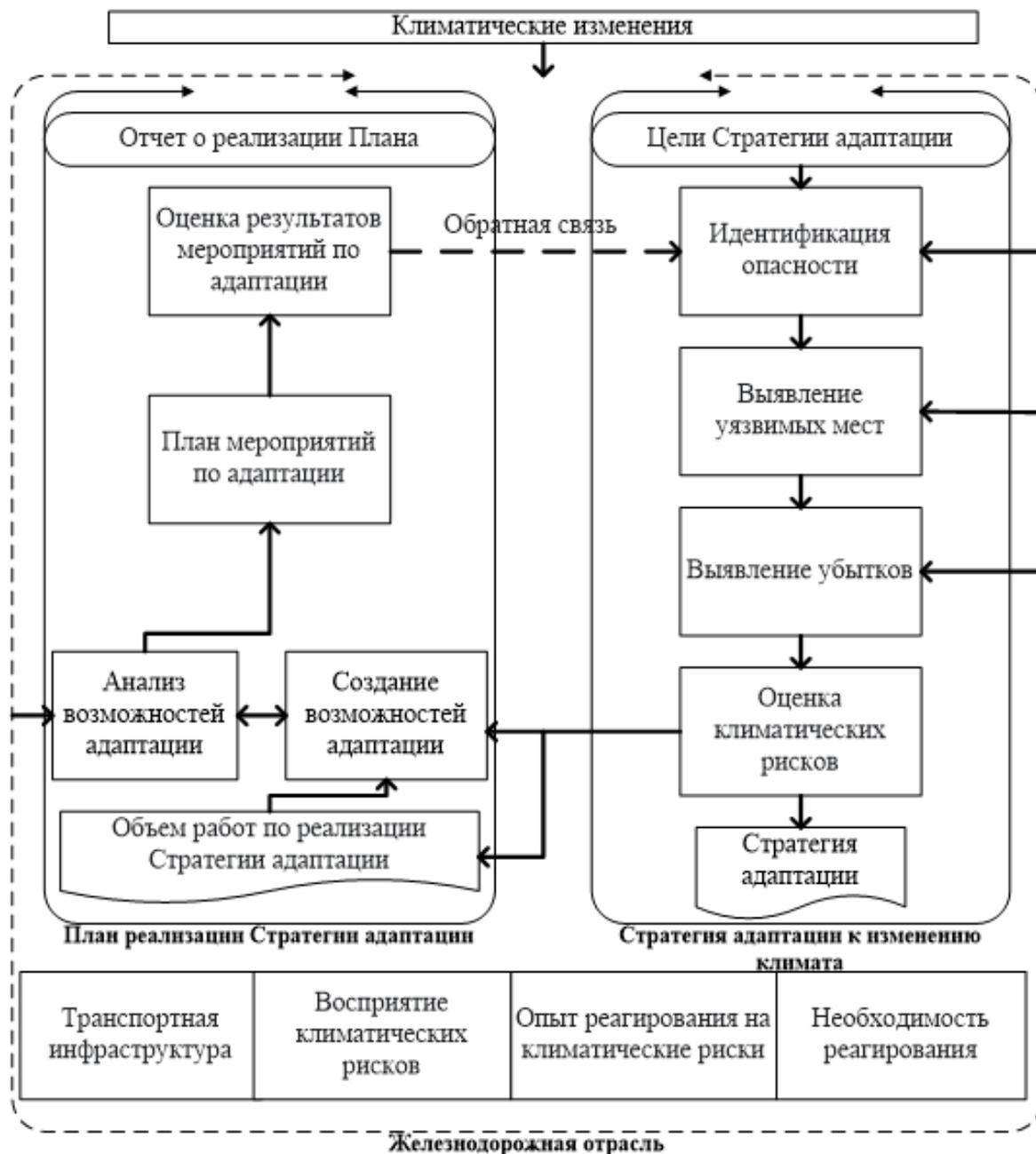


Рис. Схема формирования стратегии адаптации и плана реализации стратегии адаптации к изменению климата

Источник: составлено автором

Взаимодействие с заинтересованными сторонами (владельцы инфраструктуры, смежные организации, органы исполнительной власти и местного самоуправления) здесь имеет решающее значение, поскольку объекты инфраструктуры являются частью взаимозависимой системы, при этом отказ смежной сети инфраструктуры (например, электроснабжения) связанный с погодными условиями может повлиять на транспортную инфраструктуру. Внешние заинтересованные стороны также могут

предоставить информацию об уязвимости управляемых ими объектов при реализации климатических рисков.

Рассмотрение опасностей, уязвимостей и потерь позволяет провести комплексную оценку рисков, которая должна определить наиболее существенные риски, а также те риски, которые необходимо устранить в приоритетном порядке, исходя из целей, поставленных при разработке стратегии адаптации. При оценке следует учитывать как краткосрочные так и долгосрочные риски, а также финансовые затраты и выгоды от вмешательства или бездействия для транспортной сети и ее пользователей. Защита транспортной инфраструктуры от климатических рисков может потребовать значительных первоначальных инвестиций, однако в долгосрочной перспективе позволит предотвратить рост затрат или дорогостоящее переоснащение.

При этом следует опираться на соотнесение стоимости каждого дополнительного мероприятия по адаптации с ожидаемой величиной полученных выгод. Решения, принятые в рамках финансовой оценки могут пересматриваться и обновляться по мере изменения прогнозируемой вероятности или масштаба опасности, уязвимости инфраструктуры или социально-экономических последствий. Проведенная оценка климатического риска формирует основу стратегии адаптации, определяя объем работ для плана реализации стратегии адаптации.

Стратегия адаптации устанавливает как цели, которые должны быть достигнуты, так и приоритетные риски которые необходимо устранить. План реализации основывается на стратегии адаптации и определяет перечень мероприятий и объем работ по адаптации. Также в плане реализации стратегии рассматриваются варианты адаптации к каждому выявленному климатическому риску. Вероятно, финансирование мероприятий по адаптации будет лимитирующим фактором, значит, управлять этим ограниченным ресурсом следует таким образом, чтобы он не препятствовал достижению целевого результата. На этапе итеративного анализа вариантов рассматриваются подходы, которые можно использовать для устранения приоритетных климатических рисков в рамках существующих ограничений.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для избегания дезадаптации необходима оценка вариантов, как для ближайшего будущего, так и для долгосрочной перспективы, в противном случае ранние действия могут поставить под угрозу будущие мероприятия, например вследствие сокращения финансирования или невозможности реализации будущих мероприятий на существующих или создаваемых объектах. Например, замена оборудования, вышедшего из строя из-за природных стихийных явлений аналогичным, приведет к быстрому

восстановлению функционирования, но может вытеснить экономически эффективное оборудование в долгосрочной перспективе, если вероятность подобных опасных природных явлений возрастет.

План реализации стратегии адаптации позволяет проводить адаптацию поэтапно, причем каждый этап предназначен для снижения общего риска до приемлемого уровня по мере изменения климата. При этом вместо того, чтобы выполнять каждое мероприятие в заданное для него время (в отличие от традиционного подхода к управлению проектами), мероприятия по адаптации могут быть реализованы, когда величина климатического риска достигает заданного порога, который оценивается прогнозом и уточняется мониторингом климатических условий.

Выбрав соответствующий комплекс мероприятий по устранению приоритетных рисков, можно реализовать данный комплекс действий в соответствии с планом. Далее эффективность комплекса мер можно оценить, а полученную информацию использовать на следующем итеративном цикле посредством мониторинга и оценки эффективности.

На основании проведенной оценки возможных исходов рассмотрения целесообразности внедрения стратегии адаптации и плана реализации стратегии адаптации к климатическим изменениям выделены следующие варианты:

- структура полезна для внедрения с целью разработки стратегии по адаптации к изменению климата;
- структура является полезным инструментом для начала обсуждения в этой области и повышения осведомленности о необходимости включения адаптации к изменению климата в процесс управления;
- организации не могут уделять первостепенное внимание экологическим проблемам, поскольку им нужно решать повседневные проблемы, особенно если их знания об изменении климата не являются продвинутыми (что подчеркивает важное значение для перехода от реактивного реагирования на природные стихийные явления к проактивной адаптации для подготовки к возникновению опасных природных процессов).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенная схема адаптации ставит практическое принятие решений в центр процесса, с поправкой на неопределенности в принятии решений, особенно с учетом неопределенности масштабов и последствий изменения климата. Сформулирован поэтапный подход, состоящий из последовательных действий, которые инициируются меняющимися степенями климатического риска и при котором реализация первоочередных действий не ставят под угрозу будущие действия.

Структура циклична и итеративна, что позволяет включать уточненную информацию об изменении климата или меняющихся социально-экономических условиях, а также облегчает процесс оценки эффективности принятых адаптивных мер.

Предлагаемая структура может быть использована для включения адаптации к изменению климата в процесс управления, на основе разработки дополнительных мероприятий по адаптации, в структуру функционирования транспортного предприятия. Объект инфраструктуры после реализованных мер по адаптации к изменению климата будет иметь преимущества в надежности функционирования, что актуально в современном меняющемся мире.

**Автор заявляет, что** настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Hartmann DL, Tank AMGK, Rusticucci M. Chapter 2: Observations: Atmosphere and Surface. *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2013:159-254. doi: 10.1017/cbo9781107415324.008
2. Beniston M, Stephenson DB, Christensen OB, et al. Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections. *Clim. Chang.* 2007;81:71-95. doi: 10.1007/s10584-006-9226-z
3. Wigley TML. The effect of changing climate on the frequency of absolute extreme events. *Clim. Chang.* 2009;97:67-76. doi: 10.1007/s10584-009-9654-7
4. Cai W, Borlace S, Lengaigne M, et al. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nat. Clim. Chang.* 2014;4:111-116. doi: 10.1038/nclimate2100
5. Jaroszweski D, Hooper E, Baker C, et al. The impacts of the 28 June 2012 storms on UK road and rail transport. *Meteorol. Appl.* 2015;22:470-476. doi: 10.1002/met.1477
6. Koetse MJ, Rietveld P. The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2009;14:205-221. doi: 10.1016/j.trd.2008.12.004
7. McEvoy D, Ahmed I, Mullett J. The impact of the 2009 heat wave on Melbourne's critical infrastructure. *Local Environ.* 2012;17:783-796. doi: 10.1080/13549839.2012.678320
8. Palin EJ, Thornton HE, Mathison CT, et al. Future projections of temperature-related climate change impacts on the railway network of Great Britain. *Clim. Chang.* 2013;120:71-93. doi: 10.1007/s10584-013-0810-8
9. Ferranti E, Chapman L, Lowe C, et al. Heat-Related Failures on Southeast England's Railway Network: Insights and Implications for Heat Risk Management. *Weather Clim. Soc.* 2016;8:177-191. doi:10.1175/wcas-d-15-0068.1
10. Ferranti E, Chapman L, Lee S, et al. The hottest July day on the railway network: Insights and thoughts for the future. *Meteorol. Appl.* 2017;25:195-208. doi: 10.1002/met.1681
11. Titova T, Akhtyamov R, Nasyrova E, Elizaryev A. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020;49:473-478. doi: 10.1007/978-981-15-0450-1\_49
12. Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на

- период до 2030 года. [Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 11.03.2023. Доступно по: <https://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/ares70d1.ru.pdf>
13. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. [Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda [Internet]. [cited 2023 March 11]. (In Russ.)]. Доступно по: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOpQhLI0nUT91RjCbeR.pdf> Ссылка активна на 11.03.2023.
  14. Парижское соглашение по климату. [Parizhskoe soglasenie po klimatu [Internet]. [cited 2023 March 11]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 11.03.2023. Доступно по: [https://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/russian\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/russian_paris_agreement.pdf)
  15. Baydarashvili M, Sakharova A, Shrednik N. Conservation of mineral resources in transport and civil construction. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020;50:479-486. doi: 10.1007/978-981-15-0454-9\_50
  16. Bryn M, Afonin D, Bogomolova N. Geodetic Monitoring of Deformation of Building Surrounding an Underground Construction. *Procedia Engineering*. 2017;189:386-392. doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.061
  17. Baydarashvili M. Criteria of Geoprotection in Construction. *Procedia Engineering*. 2017;189:616-621. doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.098
  18. Ershova S, Orlovskaya T, Panfilova E. Study of Life Quality and Urban Environment Quality in Russian Megapolises. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018;463(4):042040. doi: 10.1088/1757-899X/463/4/042040

**Сведения об авторе:**

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

**Information about the author:**

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

**Цитировать:**

Ахтямов Р.Г. Разработка подходов к адаптации транспортной инфраструктуры к климатическим изменениям // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 1. – С. 34–43. doi: 10.17816/transsyst20239134-43

**To cite this article:**

Akhtyamov RG. Development of approaches for transport infrastructure adaptation to climatic change. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):34-43. doi: 10.17816/transsyst20239134-43

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Строительные конструкции и транспортные системы

УДК [UDC] 624.014.2: 625.41:656.21

DOI 10.17816/transsyst20239144-63

© Н.А. Сенькин, Д.М. Андреев, В.С. Васильев

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

## ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ: КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ

В рамках студенческих исследований в Санкт-Петербургском архитектурно-строительном университете продолжается разработка альтернативных предложений по созданию высокоскоростной магистрали в Арктической зоне вдоль Северного Морского Пути с остановками в основных транспортно-логистических центрах по побережью страны. Магистраль берет свое начало в Северо-Западном регионе России, в морском порту Усть-Луга, проходит по Ленинградской области, Заполярному региону Европейской части и Сибири и через Берингов пролив заканчивается на Аляске, соединяя собой два континента. В статье представлены результаты научно-исследовательских работ по прокладке схемы транспортной магистрали, по ее структуре и архитектурной компоновке зданий транспортно-пересадочных узлов. Также приведены результаты модельного эксперимента по исследованию конструктивной и расчетной схем каркаса здания с кольцевым пандусом.

**Обоснование:** в настоящих условиях Северный Морской Путь (СМП) представляет особый интерес для развития данного арктического транспортного направления. В августе 2022 года правительство утвердило план развития СМП до 2035 года. План включает в себя 150 мероприятий, которые входят в пять ключевых разделов, включая транспортную и электроэнергетическую инфраструктуру. В настоящий момент уровни транспортной доступности и инфраструктуры данного региона находятся на недостаточном уровне для эффективного использования полного потенциала Заполярной территории. Для обеспечения надежного функционирования СМП требуется создать дополнительную грузопассажирскую систему, характеризующуюся движением грузовых модулей со скоростью до 200 км/ч и пассажирских модулей – до 500–1000 км/ч. Проектируемая магистраль позволит соединить ключевые транспортно-логистические морские центры и в кратчайшие сроки доставлять пассажиров и грузы.

**Цель:** разработка высокоскоростной транспортной магистрали в Арктической зоне, построенной на широком применении электротранспорта.

**Материалы и методы:** построен маршрут магистрали, рассчитаны эстакадные конструкции на сочетания действующих нагрузок, сил и воздействий, включая учет динамических аспектов и нелинейности, с использованием программных комплексов "SCAD Office" и "Lira".

**Результаты:** по предварительным технико-экономическим показателям продолжительность доставки грузов по Арктической скоростной магистрали до Берингова пролива по сравнению с СМП сокращается в 5,5 раза, а пассажиров – почти в 30 раз, но при этом протяженность проектируемой скоростной магистрали почти

в 1,6 раза выше в связи с необходимостью обхода высоких прибрежных горных массивов, особенно в шельфе Восточно-Сибирского моря.

**Заключение:** при проектировании глобальной сухопутной транспортной сети данные исследования подтверждают возможность использования технологий Evacuated Tube Transportation и Маглев для Арктической скоростной транспортной магистрали. В дальнейших исследованиях будут рассмотрены подводные трубные магистрали, которые должны иметь протяженные прямолинейные участки длиной более 1000 км, обходящие прибрежные горные массивы и обеспечивающие минимизацию количества транспортно-пересадочных узлов.

**Ключевые слова:** высокоскоростная транспортная магистраль, эстакада из труб большого диаметра, магнитно-левитационная подушка, пониженное давление в трубах, вантовые и арочные конструкции.

## Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Building constructions & transport systems

© N.A. Senkin, D.M. Andreev, V.S. Vasilev

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

(St. Petersburg, Russia)

# PROPOSALS FOR THE CREATION OF HIGH-SPEED TRANSPORT HIGHWAYS IN THE ARCTIC ZONE: CONSTRUCTIONS AND TECHNOLOGIES

**Aim:** development of a high-speed transport highway in the Arctic zone, built on the widespread use of electric transport.

**Materials and Methods:** the trestle structures are designed for combinations of operating loads, forces and impacts, including consideration of dynamic aspects and nonlinearity, using the SCAD Office software package.

**Results:** according to preliminary technical and economic indicators, the duration of cargo delivery along the Arctic Expressway to the Bering Strait is reduced by 5.5 times compared to the Northern Sea Route (NSR), and passengers by almost 30 times, but at the same time the length of the projected expressway is almost 1.6 times higher due to the need to bypass high coastal mountain ranges.

**Conclusion:** when designing a global land transport network, these studies confirm the possibility of using Evacuated Tube Transportation and Maglev technologies for the Arctic High-speed Transport Highway. In further studies, underwater pipelines will be considered, which will have long straight sections with a length of more than 1000 km, bypassing coastal mountain ranges and minimizing the number of transport hubs.

**Keywords:** high-speed transport highway, beam-overpass of large diameter pipes, magnetic levitation cushion, low pressure in the pipes, cable-stayed and arched structures.

## ВВЕДЕНИЕ

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

Еще в начале XX века Российский Царь Николай Александрович Романов высочайше одобрил предложение о строительстве Сибирско-Аляскинской железной дороги от мыса Принца Уэльского на Аляске в Иркутск через туннель под Беринговым проливом через Верхнеколымск и Якутск. Но в связи с началом Первой Мировой войны проект был отменен.

24 апреля 2007 года в Москве состоялась Международная конференция «Трансконтинентальная Магистраль Евразия – Америка через Берингов пролив» [1], которая определила необходимость формирования единой глобальной сухопутной транспортной сети с целью обеспечения связи транспортных и энергетических систем Евразии и Америки. Предложено построить около 6 тыс. км железных дорог от Якутска до ближайшего узла североамериканской сети железных дорог через Магадан, Чукотку, Берингов пролив и Аляску в едином коридоре с линиями электропередачи и оптоволоконной связи. Техническая осуществимость такого проекта в настоящее время не вызывает сомнений у международного сообщества [1].

В марте 2015 года Президент РАН В.Е. Фортов (1946–2020) передал главе государства В. В. Путину четыре больших масштабных проекта, нацеленных на глобальное развитие страны, включая предложения по строительству скоростной железной дороги через Сибирь с выходом на Берингов пролив. Этот проект «Развитие», проект весьма затратный, но позволяющий решить многие проблемы по развитию огромного региона страны [2].

В Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете (СПбГАСУ) в рамках студенческих научных исследований по теме «Инновационные предложения по созданию высокоскоростной транспортной системы Санкт-Петербурга», в частности, выполняются инициативные разработки альтернативных предложений по созданию окружной надземной высокоскоростной транспортной магистрали (ВСТМ) [3, 4]. Городские ВСТМ системы «Роса» проектируется на движение высокоскоростных пассажирских электропоездов с максимальной скоростью 500 км/ч, подлежащих разработке с применением технологий Маглев и ЕТТ (Evacuated Tube Transportation) [3–20]. Так в первой авторской статье под названием «К вопросу создания высокоскоростной транспортной магистрали в Санкт-Петербурге», опубликованной в электронном журнале «Транспортные системы и технологии» [3], разработана основная концепция ВСТМ «Роса»

и представлены результаты научно-исследовательских работ (НИР) за 2017–2019 гг. по вышеуказанной теме (Часть 1). Были разработаны: окружная «кольцевая» схема и технологическая система магистрали, жесткая главная балка путепровода, представляющая собой составную многотрубную конструкцию с рельсовым путем 1520 мм и пониженным внутренним давлением на скоростных участках в каждой трубе, составляющим 1/10 от нормального атмосферного. В области строительных конструкций выполнено вариантное проектирование вантово-стержневых систем с выбором основного арочно-вантового варианта эстакадной конструктивной схемы, обеспечивающего жесткую поддержку балки путепровода [3].

Во второй статье «Предложения по строительству эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали в Санкт-Петербурге» [4] в продолжении данной темы представлены результаты НИР за 2019–2021 гг. (Часть 2), а именно: модернизация схемы прокладки транспортной магистрали; архитектурная компоновка зданий транспортно-пересадочных узлов (ТПУ); исследование предварительно-напряжения затяжек и вант на снижение основных усилий и деформаций элементов; расчеты конструкций наиболее высокого и нагруженного морского участка.

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

## КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ВСТМ

Предложенная ранее ВСТМ [3, 4] обеспечивает удобные, быстрые и безопасные высокоскоростные транспортные связи мегаполиса с пригородами и близлежащими поселениями Ленинградской области. Такая магистраль относится к внеуличной сети, так как построена на высотных и большепролетных конструкциях на эстакадной основе, которые обеспечивают оптимальное преодоление естественных и искусственных преград, включая высотную высокоплотную застройку.

На Рис. 1 представлены конструктивно-технологические элементы или технологическая структура ВСТМ, обеспечивающая возможность ее функционирования на сложных площадках с перепадами высот  $H$  и уклонами  $i$ . Посредством указанных элементов обеспечивается работоспособность функциональных зон ВСТМ, характеризующихся как уровнем давления воздуха во внутренней полости транспортных труб (1/10 нормального давления воздуха) и соответствующим скоростным

режимом движения составов, так и возможностью для составов подниматься на более высокие отметки либо опускаться вниз, например в депо.

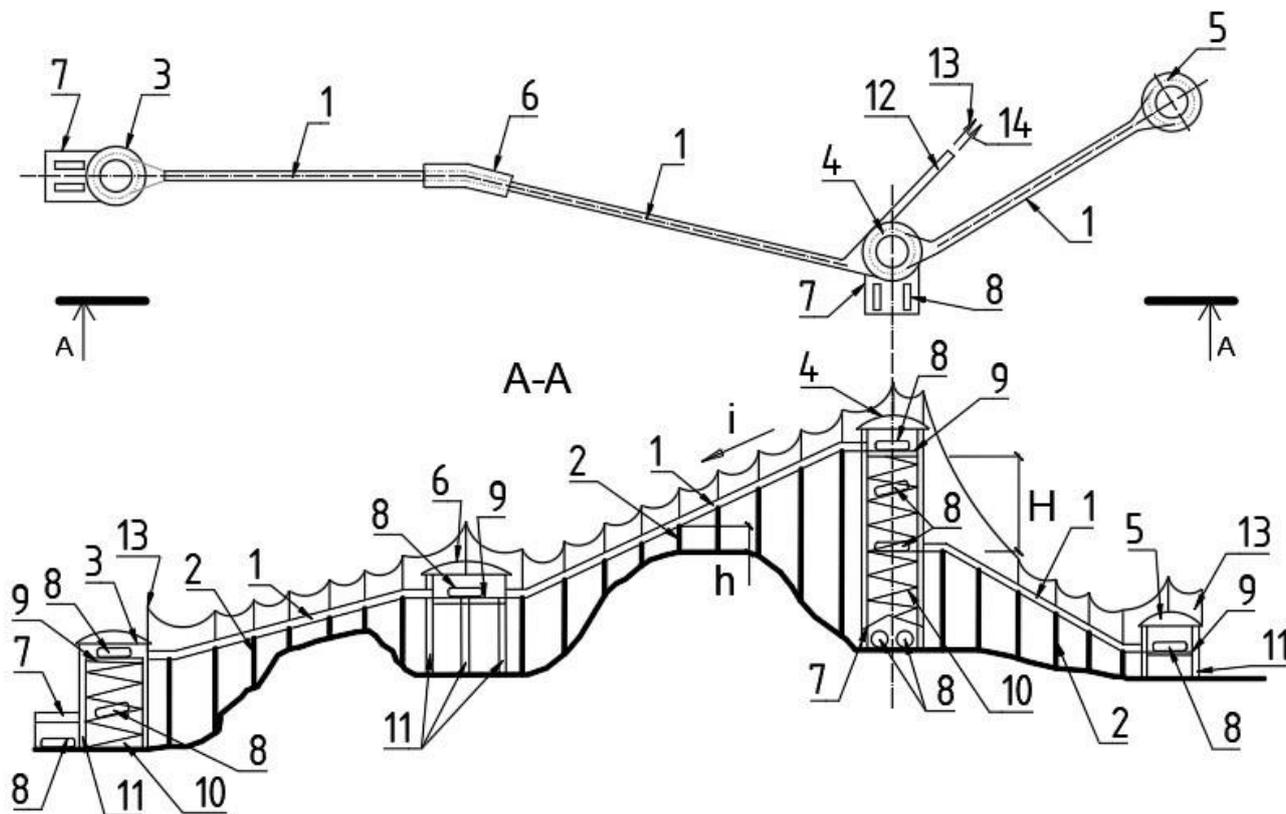


Рис. 1. Основная технологическая структура транспортно-энергетической магистрали:

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

Главная балка выполнена четырехтрубной с рельсовым основанием в каждой трубе, отведенным под транспортные нужды, включая обратное

направление. Для высокоскоростных цилиндрических модулей с пассажирами используются две трубы, расположенные по горизонтали, а для движения скоростных цилиндрических модулей с грузом, например с полезными ископаемыми, - две трубы, расположенные по вертикали, с устройством специального прохода для ремонтного персонала (рис. 2). Как вариант, для городских и пригородных условий целесообразно построение поперечной схемы балки-путепровода с двумя трубами для маломобильных пассажиров при скорости движения до 100 км/ч.

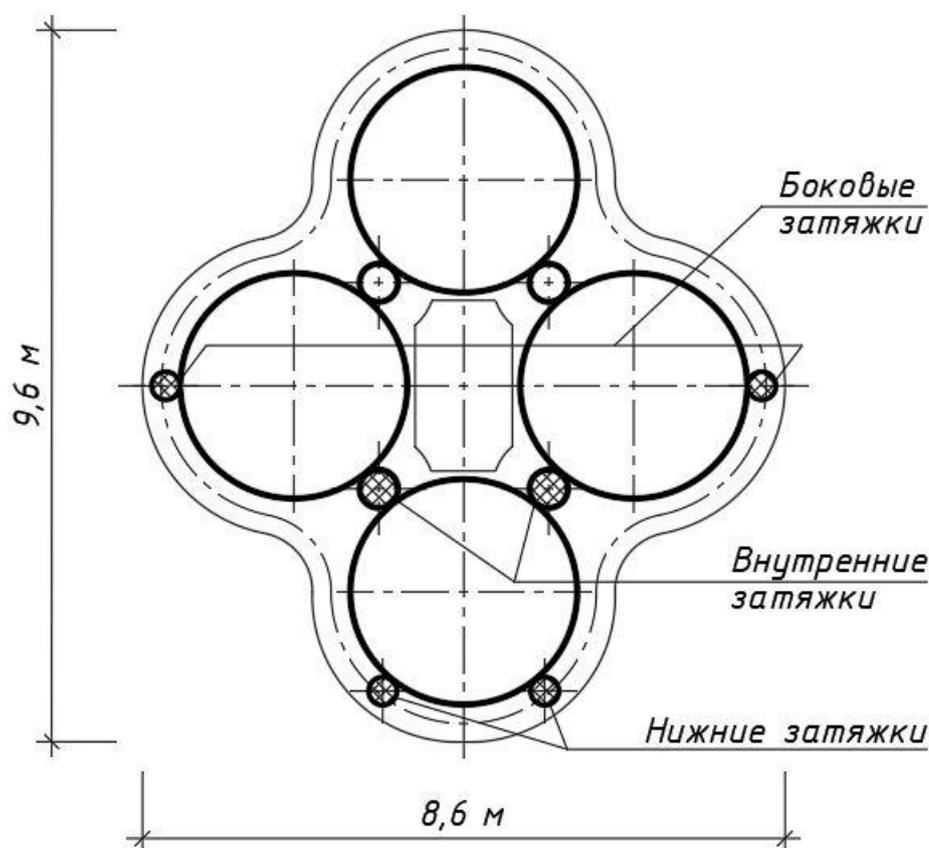


Рис. 2. Поперечное сечение балки-путепровода, усиленной предварительно-напряженными стальными канатами (затяжками), с центральным коридором

Конструктивно-технологическая схема ВСТМ на прямолинейном участке – перегоне между станциями ТПУ составлена из большепролетных арочно-вантовых эстакад пролетами 180 м и 360 м, обеспечивающих надежную и безопасную подвеску балки-путепровода. Процесс скоростного движения является равноускоренным с максимальным ускорением при движении пассажирских составов, составляющим  $a = 4,63 \text{ м/с}^2$  ( $0,47g$ ) в течение 0,5 мин (30 с). Здесь предельное значение ускорения (замедления) назначается не превышающим 50 % ( $0,5 g$ ) от

ускорения свободного падения  $g$ , что является допустимым для пассажирского транспорта. Поезд набирает максимальную скорость  $V_{max} = 500$  км/ч, но технология магнито-левитационной подушки с использованием пониженного давления в трубах позволяет достигать скорости 1000 км/ч и более. При движении на такой скорости достигается наименьшая продолжительность поездки, поэтому имеет смысл рассматривать более протяженные прямолинейные участки для обеспечения наибольшего времени движения на максимальной скорости.

Пассажирский состав общей длиной 88,0 м из 8 вагонов – модулей (общая вместимость 64 посадочных места в составе) внешне подобен скоростному поезду «Сапсан», но поперечный размер выполнен более узким, почти в 1,5 раза. Здесь обеспечен продольный проход с аварийными выходами в первом и последнем вагонах с двухрядной посадкой пассажиров. Цилиндрический транспортный модуль изготовлен на основе металлической трубы с продольным проходом и дверями типа «крылья чайки», которые поднимаются вверх при посадке – высадке.

Назначение г. Гатчина столицей Ленинградской области определило необходимость усовершенствования схема магистрали вокруг Санкт-Петербурга с добавлением нового участка ТПУ «Рыбацкое» – ТПУ «Павловск» – ТПУ «Татьянино» (Гатчина) (Рис. 3).



Рис. 3. Визуализация участка ВСТМ с ТПУ «Татьянино» (Гатчина) и интерьер перрона с пассажирским составом на разворотном кольце ТПУ «Татьянино»

Как правило, здания ТПУ имеют цилиндрическую форму исполнения и содержат в себе спиральные пандусы для спуска подвижных составов в обслуживающее депо на поверхности земли, например ТПУ «Рыбацкое» (Рис. 1, вариант 1). Ввиду стесненных условий промежуточная станция в Павловске выполнена в форме открытой книги по стандартной схеме без изменения высотного уровня путепровода магистрали, но обеспечивающая поворот направления движения поездов транспортной магистрали (Рис. 1, вариант 4). ТПУ «Татьянино» выполнено с платформой для посадки

пассажиров и стоянки составов в виде разворотного кольца (Рис. 1, вариант 3) по форме в виде гриба также в связи со стесненностью площадки.

Следует заметить, что местность от Павловска к г. Гатчина представляет собой весьма возвышенную территорию с отметками до 110,0 м выше Балтийского уровня (Рис. 4).

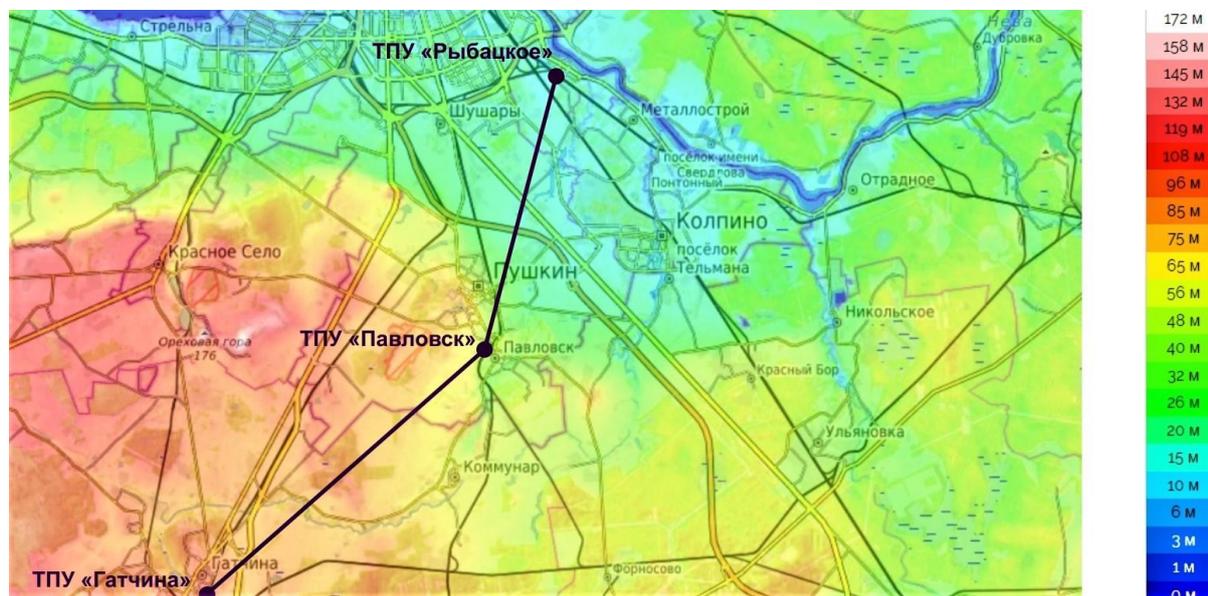


Рис. 4. Принципиальная схема магистрали на участке ТПУ «Рыбацкое» – ТПУ «Павловск» – ТПУ «Татьянино» (Гатчина) на физической карте с высотами местности

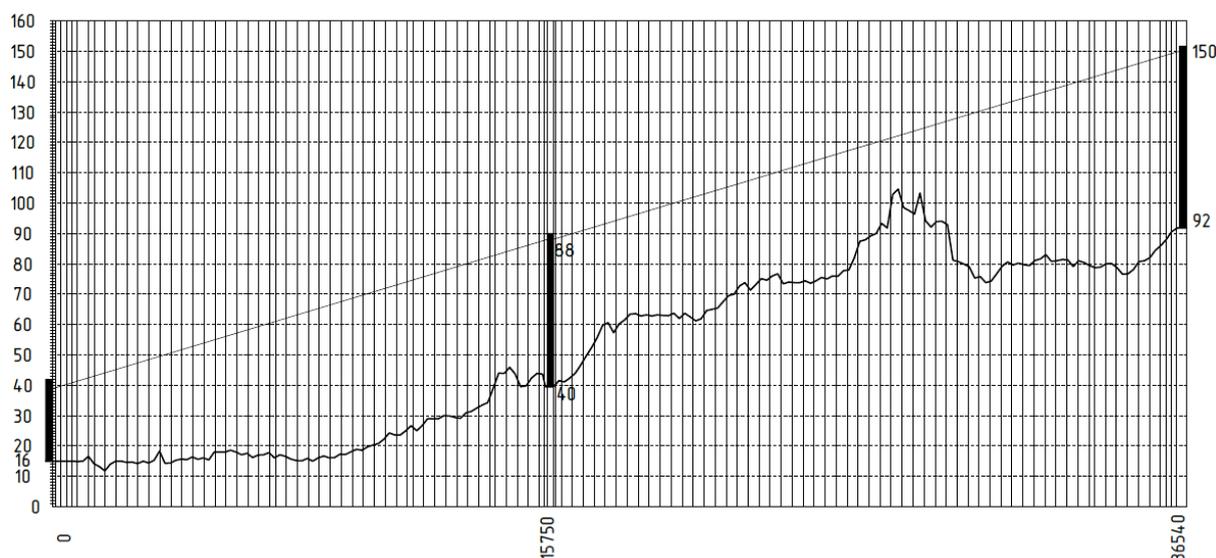


Рис. 5. Профиль рельефа местности магистрали на участке ТПУ «Рыбацкое» – ТПУ «Павловск» – ТПУ «Татьянино» (Гатчина) со зданиями ТПУ и осью путепровода с уклоном всего 3 ‰ (высоты и расстояния, в м)

Преодоление значительных вертикальных препятствий производится при учете допустимого продольного наклона путепровода в интервале 3–40 ‰ (промиле), принимаемого для водоотведения аналогично

нормативным требованиям п. 5.3.9 СП120 «Метрополитены» и преодоления высоких мест (Рис. 5).

В феврале 2022 года в Механической лаборатории СПбГАСУ имени профессора Н.Н. Аистова завершен модельный эксперимент для выяснения распределения усилий между элементами в сложных зданиях круговой формы. Целью эксперимента стало сравнение полученных результатов с теоретическими с подтверждением гипотезы о возможности расчета элементов кольцевого пандуса как кольцевых балок с жесткими опорами, что значительно упрощало понимание работы такой конструкции и ее проектирование. В процессе исследования принята модель ТПУ в масштабе 1:500 на основе первого варианта (Рис. 1), сваренная из стальных профилей коробчатого сечения размером 25x25x2 мм для стоек модели и 16x16x1 мм для балок пандуса (Рис. 6).



Рис. 6. Испытательная модельная установка для исследования каркаса транспортно-пересадочного узла с кольцевым пандусом, загружаемая весовой нагрузкой, с тензометрическими измерениями напряжений

Результаты эксперимента и расчета на ПК LIRA 10.8 показали отклонение в 10,7 % в сторону запаса прочности, чем подтвердили

возможность таких приближенных расчетов балок спирального пандуса как однопролетных балок с заземленными опорами (Рис. 7).

Эффективность работы высокоскоростной транспортной магистрали весьма высока. Так, при скорости 500 км/ч продолжительность переезда от ТПУ «Татьянино» до ТПУ «Рыбацкое» со станцией метро «Рыбацкое», составит не более 13 мин при расстоянии 39 км, а от ТПУ «Рыбацкое» до ТПУ «Кронштадт», расположенных на схеме ВСТМ диаметрально, с расстоянием 83,4 км всего за 27 мин [4].

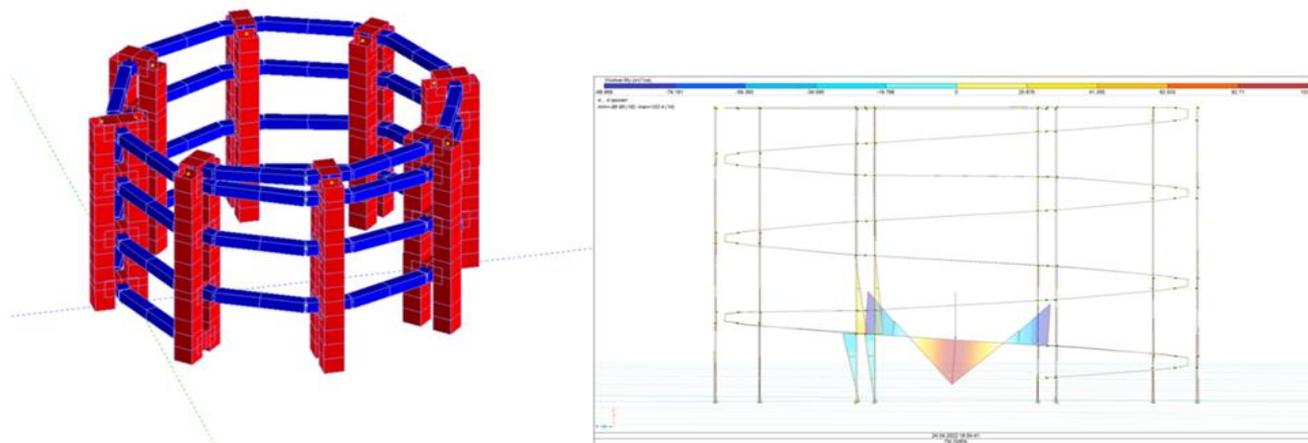


Рис. 7. Расчетная пространственная модель и результаты расчета в ПК LIRA 10.8

## СХЕМА АРКТИЧЕСКОЙ СКОРОСТНОЙ МАГИСТРАЛИ

На этой основе, представленной в предыдущем разделе, разработаны решения по высокоскоростной Арктической транспортно-энергетической магистрали (АТЭМ). Магистраль берет свое начало в Северо-Западном регионе России (морской порт Усть-Луга), проходит по Ленинградской, Вологодской, Архангельской областям, Заполярному региону Европейской части, Сибири и Дальнего Востока, через Берингов пролив и заканчивается на Аляске, соединяя собой два континента.

Еще в советское время руководство страны понимало какой прорыв в экономике отдаленных районов страны может дать использование Северного морского пути (СМП), а в настоящее время освоение СМП продолжается наиболее интенсивно. Так «Газпром», «ЛУКОЙЛ», «Роснефть», «Росшельф», Красноярский край, Якутия, Чукотка являются его основными пользователями. Эксплуатация СМП приведет к снижению стоимости добываемой и производимой в Арктической зоне продукции и, как следствие, повысит ее конкурентоспособность на внутреннем и мировом рынках.

В августе 2022 года правительство утвердило план развития Северного морского пути до 2035 года (распоряжение от 01.08.2022

№ 2115-р). Всего план включает в себя 150 мероприятий, которые входят в пять ключевых разделов, одним из которых является транспортное и энергетическое обеспечение. При этом создание АТЭМ несомненно представляется весьма эффективным решением в рамках развития береговой транспортной, электроэнергетической и аварийно-спасательной инфраструктуры, связывающей морские порты СМП на побережье Белого моря и Северного ледовитого океана (Архангельск, Тикси, Диксон, Певек и т. п.).

На Рис. 8 представлены предложения по устройству двух Арктических скоростных магистралей:

- надземная АТЭМ (протяженность 9683 км) с отечественным и зарубежным участками «Усть-Луга - о. Ротманова» (8422 км), «о. Ротманова – Fairbanks» (1261 км);
- надводная магистраль «Мурманск – Шпицберген» (1350 км), которая будет рассмотрена в следующих публикациях.

Предлагаемая Арктическая транспортно-энергетическая магистраль позволит соединить ключевые транспортно-логистические морские центры и в кратчайшие сроки доставлять к ним персонал, грузы, оборудование, обеспечивать электроэнергией и выполнять аварийно-спасательные функции, например при помощи аварийно-восстановительных поездов и специальной техники для спасения на суше и на море. Представленный вариант прокладки маршрута АТЭМ основан на нескольких важных фундаментальных принципах:

- магистраль АТЭМ проходит через важные логистические центры и города на морском побережье Северного ледовитого океана, на которых устроены пристани для ледокольного флота или развита добыча природных ископаемых;
- устраиваются протяженные прямолинейные участки для сокращения количества ТПУ, ездой с максимальной скоростью и обеспечением минимизации продолжительности поездки;
- минимальные перепады высот рельефа и уход от природных препятствий (гор, водоемов) для минимизации времени поездки.

Станции с остановками или ТПУ, расстояние между ними и продолжительность поездки представлены в Табл. 1.



Рис. 8. Схемы трех магистралей:

- надземная высокоскоростная Арктическая транспортно-энергетическая магистраль «Усть-Луга – Fairbanks» (красный цвет);
- надводная скоростная магистраль «Мурманск-Шпицберген» (фиолетовый цвет);
- Северный морской путь из Архангельска (зеленый цвет)

Таблица. АТЭМ, протяженность и продолжительность проезда

№	Участок	Длина (км)	Время проезда (мин) при максимальной скорости (км/ч)		
			160	500	1000
1	Усть-Луга – Гатчина	110	43,62	15,65	9,08
2	Гатчина – Тихвин	188	72,87	25,01	13,76
3	Тихвин – Череповец	239	92,00	31,13	16,82
4	Череповец – Архангельск	591	224,01	73,38	37,94
5	Архангельск – Нарьян-Мар	677	256,26	83,70	43,10
6	Нарьян-Мар – МореЮ	296	113,37	37,98	20,24
7	МореЮ – Байдарацкая Губа	316	120,87	40,38	21,44
8	Байдарацкая Губа – Полярный Урал	83	33,49	12,41	7,46
9	Полярный Урал – Салехард	167	64,99	22,49	12,50
10	Салехард – Надым	280	107,37	36,05	19,28
11	Надым – Новый Уренгой	202	78,12	26,69	14,60
12	Новый Уренгой – Дудинка	560	212,38	69,66	36,08
13	Дудинка – Новая Река	609	230,76	75,54	39,02
14	Новая Река – Хатанга	98	39,12	14,21	8,36
15	Хатанга – Юрюнг-Хая	368	140,38	46,62	24,56
16	Юрюнг-Хая – Анабарский Залив	128	50,37	17,81	10,16
17	Анабарский Залив – Оленек	98	39,12	14,21	8,36
18	Оленек – Дельта Лены	353	134,75	44,82	23,66
19	Дельта Лены – Порт Тикси	80	32,37	12,05	7,28
20	Порт Тикси – Горный Хребет	57	23,74	9,29	5,90
21	Горный Хребет – Найба	90	36,12	13,25	7,88
22	Найба – Янский Залив	115	45,49	16,25	9,38
23	Янский Залив – Тумат	195	75,49	25,85	14,18
24	Тумат - Хромская Губа	284	108,87	36,53	19,52
25	Хромская Губа - Черский	650	246,14	80,46	41,48
26	Черский - Колымский Залив	114	45,12	16,13	9,32
27	Колымский Залив – Чаунская Губа	280	107,37	36,05	19,28
28	Чаунская Губа – Быстрый	137	53,74	18,89	10,70
29	Быстрый – Пролив Лонга	174	67,62	23,33	12,92
30	Пролив Лонга – Лагуна Тыркунгин	189	73,24	25,13	13,82
31	Лагуна Тыркунгин – Колючинская Губа	355	135,50	45,06	23,78
32	Колючинская Губа – Чукотское Море	89	35,74	13,13	7,82
33	Чукотское Море – Мыс Икигур	94	37,62	13,73	8,12
34	Мыс Икигур – Берингов Пролив	115	45,49	16,25	9,38
35	Берингов Пролив – Остров Ратманова	41	17,74	7,37	4,94
36	Остров Ратманова – Alaska	53	22,24	8,81	5,66
37	Alaska – Shishmarev	118	46,62	16,61	9,56

№	Участок	Длина (км)	Время проезда (мин) при максимальной скорости (км/ч)		
			160	500	1000
38	Shishmarev – Kotzebue Sound	111	43,99	15,77	9,14
39	Kotzebue Sound – Imruk	116	45,87	16,37	9,44
40	Imruk – Golovin	110	43,62	15,65	9,08
41	Golovin – Koyukuk	332	126,87	42,30	22,40
42	Koyukuk – Yukon	256	98,37	33,17	17,84
43	Yukon – Fairbanks	165	64,24	22,25	12,38
	<b>ИТОГО:</b>	9683	3733,07	1267,50	687,54
	<b>ИТОГО (в часах):</b>		62,2 ч	21,1 ч	11,5 ч

Даже с учетом требований по прокладке магистрали, приведенных выше, рельеф остается довольно сложным, что вызывает дополнительные трудности и финансовые затраты, а главное – увеличивает количество ТПУ и продолжительность поездки. Кроме того, скоростное преодоление высоких горных склонов приводит к дополнительным конструктивным усложнениям конструкций и фундаментов магистрали (Рис. 9), повышая материалоемкость, и ухудшает качество поездки в связи с восхождением и понижением положения поезда.

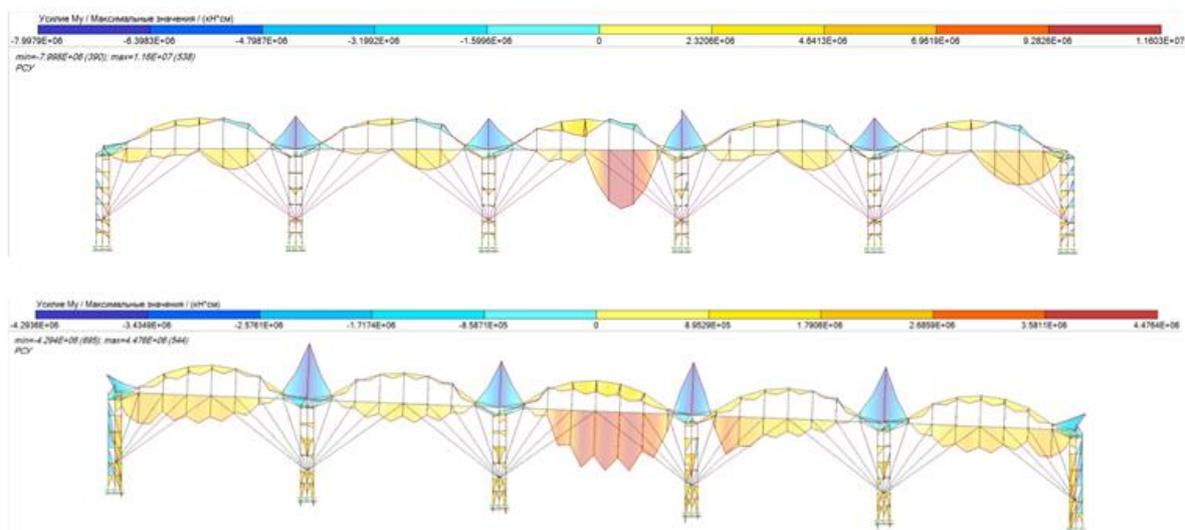


Рис. 9. Сравнительные расчеты арочно-вантовых конструкций АТЭМ на ПК LIRA10.8 с малым уклоном  $i=0,003$  (верхний рисунок) и максимально допустимым уклоном  $i=0,040$  путепровода (нижний рисунок); представлены эпюры моментов в пятипролетной раме из арок пролетом 180 м, загруженной в середине

На основании сравнительных расчетов следует вывод, что с повышением уклона возрастают продольные усилия на 8–18 %, поперечные силы понижаются на 14–29 %, а изгибающие моменты в балке

путепровода снижаются существенно на 36–61 %, что подтверждает необходимость индивидуального проектирования каждого участка Арктической магистрали.

Таким образом магистраль на большом участке от Усть-Луги до пос. Черский на Колыме в Якутии можно провести с небольшим уклоном  $i \leq 0,003 \dots 0,004$ , который будет обеспечивать как дренирование внутреннего пространства труб, так и в прохождении относительно невысоких перепадов с отметкой до 250 м по Балтийской системе высот. Но после пос. Черский (ТПУ «Черский Залив») вертикальные отметки путепровода АТЭМ уже достигнут почти 700 м (Рис. 10). Для решения этой проблемы предлагается альтернативный вариант с морским участком - минимальным количеством ТПУ и сокращением продолжительности проезда до конечного пункта – города Fairbanks на Аляске за 8–9 часов при скорости 1000 км/ч. На этом участке АТЭМ проходит в подводном пространстве между нижней поверхностью арктических льдов и дном Восточно-Сибирского моря (

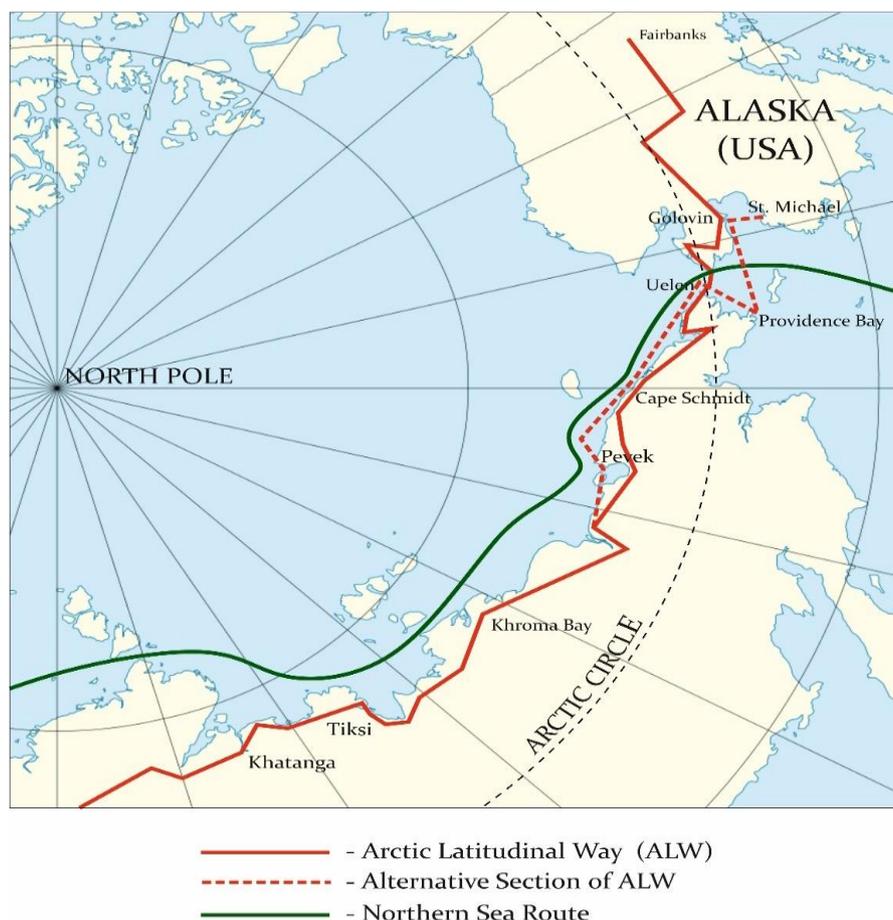


Рис. 11).

Рис. 11. Альтернативный вариант с морским подводным участком (красная пунктирная линия)

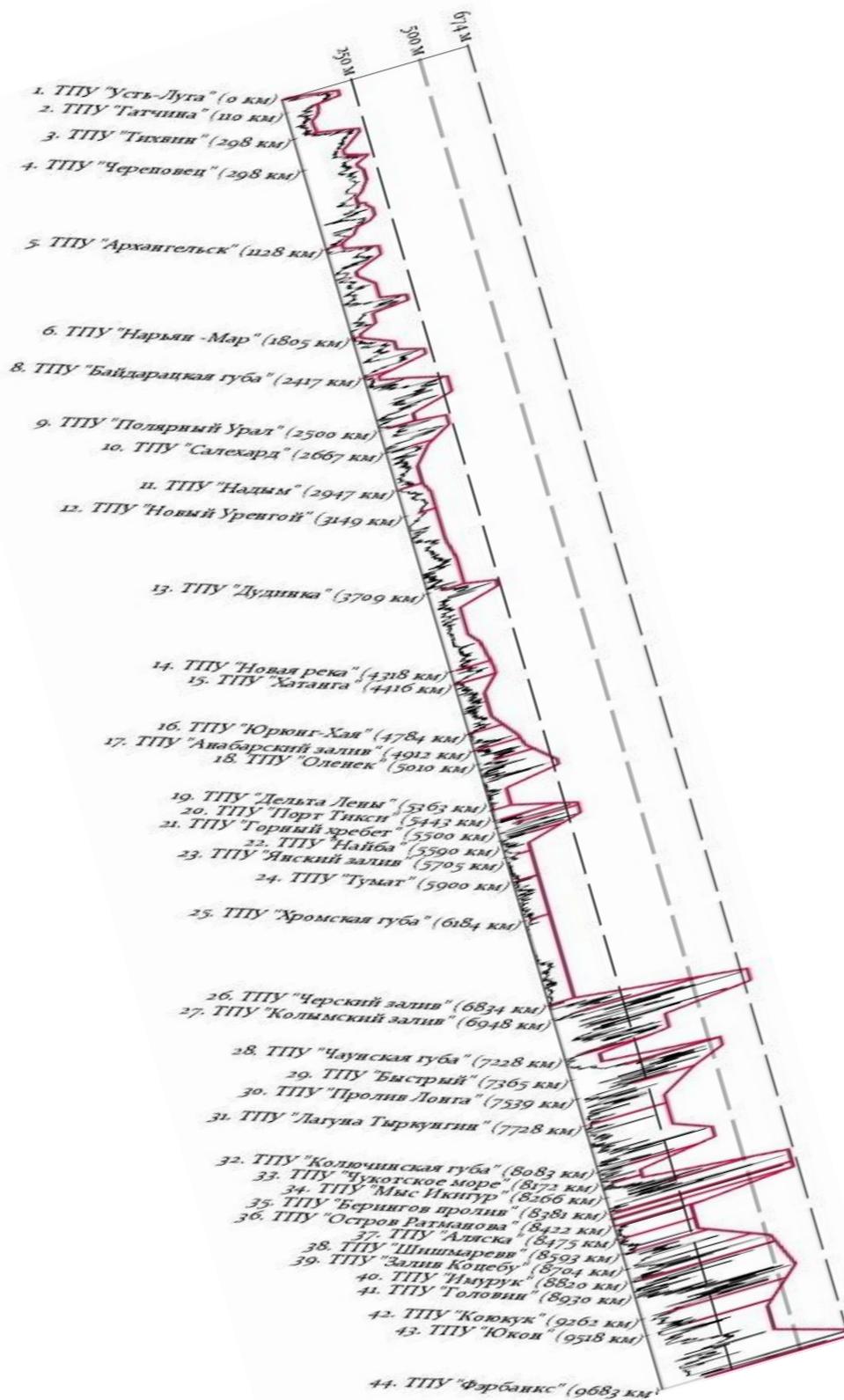


Рис. 10. Профиль Арктической ТЭМ и возможный надземный вариант ее прокладки (красная огибающая линия – ось балки путепровода)

Подводное прохождение Арктической транспортной магистрали в водах Северного ледовитого океана потребует глубокого исследования данного вопроса в настоящей перспективе, так как представляется весьма сложной технической задачей [20].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При проектировании глобальной сухопутной транспортной сети данные исследования подтверждают возможность использования технологии ЕТТ (Evacuated Tube Transportation), а также магнитной левитации (технология Маглев), для высокоскоростной Арктической транспортно-энергетической магистрали.

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

3. Предложен вариант Арктической транспортно-энергетической магистрали, позволяющий в перспективе соединить ключевые транспортно-логистические морские центры Северного ледовитого океана и в кратчайшие сроки доставлять к ним персонал, грузы, оборудование, обеспечивать электроэнергией и выполнять аварийно-спасательные функции, а также обеспечить проезд пассажира от Санкт-Петербурга до города Fairbanks на Аляске почти за 11 часов.

4. В дальнейших исследованиях следует рассмотреть подводные трубные магистрали, которые будут иметь протяженные прямолинейные участки длиной более 500-1000 км с минимизацией количества транспортно-пересадочных узлов.

5. Трансконтинентальная магистраль через Берингов пролив в целях обеспечения связи транспортных и энергетических систем Евразии и Америки представляется как самый грандиозный проект за всю историю человечества, сопоставимый с освоением космоса!

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках конкурса грантов, утвержденного решением Ученого совета Санкт-Петербургского архитектурно-строительного университета Минобрнауки России от 23.12.2021 №03, в составе НИР «Экспериментально-теоретические исследования эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали» (шифр № 2С22).

**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. Международная конференция «Трансконтинентальная магистраль Евразия-Америка через Берингов пролив» // Forum International. – 2007. – № 7. – 80 с. [International Conference “Intercontinental Eurasia-America Transport Link via Bering Strait”. *Forum International*. 2007;(7):1-80. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 30.10.2022. Доступно по: [https://larouchepub.com/eiw/public/2007/2007\\_20-29/2007-24/pdf/forum\\_7.pdf](https://larouchepub.com/eiw/public/2007/2007_20-29/2007-24/pdf/forum_7.pdf)
2. РАН предложила Путину проект железной дороги через Сибирь // Газета «Взгляд». 23.03.2015. Ссылка активна на: 30.10.2022. Доступно по: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=137215>
3. Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Харитонов К.Е. и др. К вопросу о создании высокоскоростной транспортной магистрали в Санкт-Петербурге // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 25–47. [Senkin NA, Filimonov AS, Kharitonov KE, et al. On the Creation of a High-Speed Transport Highway in St. Petersburg. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):73-95. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20195425-47
4. Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Халимбеков И.М. и др. Предложения по строительству эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали в Санкт-Петербурге // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 99–123. [Senkin NA, Filimonov AS, Khalimbekov IM, et al. Proposals for the construction of overpass structures and transport hubs for the high-speed highway in Saint Petersburg. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(1):99-123. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20217199-123
5. Зайцев А.А. Инновации как способ решения глобальных задач // РЖД-Партнер. – 2018. – № 13–14. – С. 35. [Zaitsev AA. *Innovatsii kak sposob reshenia globalnykh zadach* // RZD-PARTNER. 2018;13-14:35. (In Russ.)].
6. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 476 p. ISBN 978-5-9221-1540-7 (In Russ.)].
7. Лаппо Г.М. Города России. Взгляд географа. – М.: Новый хронограф, 2012. – 504 с. [Lappo GM. *Goroda Rossii. Vzglyad geografa*. Moscow: Novyj khronograf, 2012. 504 p. (In Russ.)].
8. Меркулова М.В. Многофункциональный транспортно-пересадочный узел, включающий высоко- и сверхскоростные магистрали / Актуальные проблемы строительства. Материалы 70-й Всероссийской научно-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Санкт-Петербургского госуд. архитектурно-строительного ун-та. Ч.1. СПбГАСУ. – СПб, 2017. – С. 244–248. [Merkulova MV. *Mnogofunktsional'nyj transportno-peresadochnyj uzel, vkluchayushchij vysoko- i sverhskorostnye magistrali*. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 70-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St-Petersburg: GASU; 2017. pp. 244-248 (In Russ.)].
9. Медведев Н.Е. Варианты конструктивных решений надземных сооружений высоко- и сверхскоростной транспортной систем / Актуальные проблемы строительства. Материалы 70-й Всероссийской научно-практической конф. студентов, аспирантов

- и молодых ученых Санкт-Петербургского госуд. архитектурно-строительного ун-та. Ч.1. СПбГАСУ. – СПб, 2017. – С. 240–244. [Medvedev NE. Varianty konstruktivnyh reshenij nadzemnyh sooruzhenij vysokoi sverhskorostnoj transportnoj system. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 70-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St-Petersburg: GASU; 2017. pp. 240-244 (In Russ.)].
10. Якуненкова М.С. Транспортный хаб как тип общественного комплекса. Функциональные элементы транспортного хаба / Архитектура – строительство – транспорт: материалы 72-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. Ч.1. СПбГАСУ. – СПб, 2019. – С. 185–189. [Yakunenkova MS. Transportnyj hab kak tip obshchestvennogo kompleksa. Funkcional'nye elementy transportnogo haba. In Aktual'nye problemy stroitel'stva. Materialy 72-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St-Petersburg: GASU; 2019. pp. 185-189 (In Russ.)].
  11. Бондарева Е.О. Городской многофункциональный транспортно-пересадочный узел, включающий высокоскоростную магистраль / Актуальные проблемы строительства. Материалы 70-й Всероссийской научно-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Санкт-Петербургского госуд. архитектурно-строительного ун-та. Ч.1. СПбГАСУ. – СПб, 2017. – С. 207–211. [Bondareva EO. Gorodskoj mnogofunkcional'nyj transportno-peresadochnyj uzel, vklyuchayushchij vysokoskorostnuyu magistral'. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 70-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St-Petersburg: GASU; 2017. pp. 207-211 (In Russ.)].
  12. Андреев Д.М., Большихшапок И.С. Предложения по строительству эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали от Гатчины до Санкт-Петербурга / Магистратура – транспортной отрасли. Материалы VI Всероссийской межвузовской конференции «Магистерские слушания». 21–22 октября 2021 г. СПбГАСУ. – СПб, 2022. – С. 9–22. [Andreev DM, Bolshikhshapok IS. Proposal for the construction of overpass and transportation hubs of the high-speed railway from Gatchina to Saint Petersburg. In Magistratura – transportnoy otrasly. Materialy VI-j Vserossijskoj mezhvuz. konf. Magistr. Slushania. St. Petersburg: GASU; 2022. pp. 9-22 (In Russ.)].
  13. Вакуленко С.П., Евреенова Н.Ю. Техническое оснащение и технология работы транспортно-пересадочных узлов, формируемых с участием железнодорожного транспорта: Учебное пособие. – М.: МИИТ, 2015. – 195 с. [Vakulenko SP, Evreenova NYu. Tekhnicheskoe osnashchenie i tekhnologiya raboty transportno-peresadochnyh uzlov, formiruemyh s uchastiem zheleznodorozhnogo transporta: Uchebnoe posobie. Moscow: MIIT; 2015. 195 p. (In Russ.)].
  14. Terentyev YuA, Filimonov VV, Malinetskiy GG, et al. Russia Integrated Transit Transport System (ITTS) Basid on Vacuum Magnetic Levitation Transport (VMLT). *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(3):57-84. doi: 10.17816/transsyst201843s157-84
  15. Kim KK. The Russian Version of the Transport System “Hyperloop”. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):73-91. doi: 10.17816/transsyst20184273-91
  16. Musk E. Huperloop Alpha. Texas: SpaceX [cited 2019 July 28]. Available at: [https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop\\_alpha-20130812.pdf](https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf)
  17. Федорова М.В. Скоростной городской транспорт для современной агломерации // Транспортные системы и технологии. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 26–36. [Fedorova MV. Speed urban transport for modern agglomeration. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(1):26-36 (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20151126-36

18. Галашкин Г.Н. Особенности проектирования и строительства Маглев-дорог для грузовых перевозок // Транспортные системы и технологии. – 2016. – Т. 2. – № 2. – С. 53–56. [Talashkin GN. Features of design and construction Maglev-road to freight. *Transportation systems and technology*. 2016;2(2):53-56 (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20162253-56
19. Oster Daryl, inventor. Evacuated tube transport. United States patent US5950543 (A). 1999 Sept. 14. Available from: <https://patents.google.com/patent/US5950543A/en>
20. Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Халимбеков И.М. О живучести строительных конструкций морского участка высокоскоростной транспортной магистрали от навала судна // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)* – 2020. – № 11. – С. 40–46. [Sen'kin NA, Filimonov AS, Halimbekov IM. O zhivuchesti stroitel'nyh konstrukcij morskogo uchastka vysokoskorostnoj transportnoj magistrali ot navala sudna. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. 2020;(11):40-46 (In Russ.)].

#### Сведения об авторах:

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

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

E-mail: senkin1952@yandex.ru

**Андреев Дмитрий Максимович**, бакалавр;

eLibrary SPIN: 2740-6795; ORCID: 0000-0003-2242-5731

E-mail: andreevd\_m@mail.ru

**Васильев Валерий Сергеевич**, бакалавр;

eLibrary SPIN: -; ORCID: 0000-0002-9247-9818

E-mail: valera-vasilev-99@mail.ru

#### Information about authors:

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

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

E-mail: senkin1952@yandex.ru

**Dmitry M. Andreev**, Bachelor of Science.

eLibrary SPIN: 2740-6795; ORCID: 0000-0003-2242-5731

E-mail: andreevd\_m@mail.ru

**Valery S. Vasilev**, Bachelor of Science.

eLibrary SPIN: - ORCID: 0000-0002-9247-9818

E-mail: valera-vasilev-99@mail.ru

#### Цитировать:

##### To cite this article:

Сенькин Н.А., Андреев Д.М., Васильев В.С. Предложения по созданию высокоскоростных транспортных магистралей в Арктической зоне: конструкции и технологии // *Инновационные транспортные системы и технологии*. – 2023. – Т. 9. – № 1. – С. 44–63. doi: 10.17816/transsyst20239144-63

##### To cite this article:

Senkin NA, Andreev DM, Vasilev VS. Proposals for the creations of high-speed transport Highways in The Arctic zone: Constructions and Technologies. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):44-63. doi: 10.178/transsyst20239144-63

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

УДК [UDC] 629.423.1

DOI 10.17816/transsyst20239164-82

© **К.И. Доманов, К.В. Богунов**

Омский государственный университет путей сообщения

(Омск, Россия)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ЗЭС6 НА УРАЛО-СИБИРСКОМ ПОЛИГОНЕ

**Обоснование:** развитая экономика требует соответствующего уровня развития транспортной системы, она составляет важную основу для концентрации и специализации производства. Следовательно, общее развитие регионов и страны в целом требует развития и модернизации транспортной системы, что оказывает непосредственное влияние на социально-экономическое развитие. В связи с этим для решения задач, связанных с повышением эффективности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте необходимо внедрять усовершенствованные тяговые ресурсы. В настоящее время в компании ОАО «РЖД» ведется активная работа по обновлению корпоративного локомотивного парка и решается вопрос внедрения тягового электрического подвижного состава повышенной мощности, за счет применения бустерных секции электровозов, для вождения поездов повышенной массы и длины на стратегически важных железнодорожных участках России интегрированных в международные транспортные коридоры.

**Цель:** разработать имитационную модель эксплуатации электровозов ЗЭС6 с бустерной секцией на участках Урало-Сибирского полигона, провести оценку готовности транспортной инфраструктуры при использовании исследуемых локомотивов в поездной работе, определить наиболее подходящие тяговые плечи для эксплуатационной работы таких электровозов.

**Материалы и методы:** для получения результатов используются тяговые характеристики рассматриваемых локомотивов, данные анализа тяговых плеч эксплуатации и транспортной инфраструктуры с использованием навигационной системы Yandex Maps, а также российское программное обеспечение E2 для создания графическо-физических 3D моделей с последующим имитационным моделированием, реализованного в программных комплексах Substance Painter и 3Ds max.

**Результаты:** представлен анализ участков эксплуатации исследуемых локомотивов с указанием достоинств и недостатков использования в перевозочном процессе электровозов ЗЭС6, разработана имитационная модель взаимодействия объектов инфраструктуры и локомотивного парка, определена перспектива дальнейших исследований в части проведения расчетов технико-экономического обоснования замены парка локомотивов устаревших серий.

**Заключение:** полученные результаты исследования можно использовать при организации эксплуатационной работы и технического обслуживания локомотивов ЗЭС6 с бустерными секциями для совершенствования технологии эксплуатации корпоративного локомотивного парка при полигонной структуре управления перевозочным процессом.

**Ключевые слова:** Имитационное моделирование, тяговый электрический подвижной состав, 2ЭС6, 3ЭС6, Урало-Сибирский полигон, эксплуатация локомотивного парка, графическо-физическое программное обеспечение E2.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Ground transport and logistics facilities and complexes

© **Kirill I. Domanov, Kirill V. Bogunov.**

Omsk State Transport University

(Omsk, Russia)

## OPERATING EFFICIENCY OF 3ES6 ELECTRIC LOCOMOTIVES AT THE URAL-SIBERIAN POLYGON

**Background:** developed economy requires an appropriate level of development of the transport system, it forms an important basis for the concentration and specialization of production. Consequently, the overall development of the regions and the country as a whole requires the development and modernization of the transport system, which has a direct impact on socio-economic development. In this regard, in order to solve the problems associated with increasing the efficiency of the transportation process in railway transport, it is necessary to introduce improved traction resources. Currently, Russian Railways is actively working to upgrade the corporate locomotive fleet and is addressing the issue of introducing high-capacity electric traction rolling stock, through the use of booster sections of electric locomotives, to drive trains of increased mass and length on strategically important railway sections of Russia integrated into international transport corridors.

**Aim:** to develop a simulation model for the operation of 3ES6 electric locomotives with a booster section in the areas of the Ural-Siberian test site, to assess the readiness of the transport infrastructure when using the studied locomotives in train operation, to determine the most suitable traction arms for the operational operation of such electric locomotives.

**Materials and Methods:** to obtain the results, the traction characteristics of the locomotives under consideration, data from the analysis of the traction arms of operation and transport infrastructure using the Yandex Maps navigation system, as well as Russian E2 software for creating graphic-physical 3D models with subsequent simulation, implemented in the Substance Painter and 3Ds software systems, are used max.

**Results:** an analysis of the areas of operation of the studied locomotives is presented, indicating the advantages and disadvantages of using 3ES6 electric locomotives in the transportation process, a simulation model of the interaction of infrastructure facilities and the locomotive fleet is developed, the prospect of further research is determined in terms of carrying out calculations of a feasibility study for replacing the fleet of obsolete series locomotives.

**Conclusion:** the obtained results of the study can be used in the organization of operational work and maintenance of 3ES6 locomotives with booster sections to improve the technology of operating a corporate locomotive fleet with a polygon structure for managing the transportation process.

**Key words:** Simulation modeling, traction electric rolling stock, 2ES6, 3ES6, Ural-Siberian test site, locomotive fleet operation, E2 graphic-physical software.

## ВВЕДЕНИЕ

Магистральный грузовой электровоз серии ЭС6 «Синара», выпускаемый на передовом предприятии транспортного машиностроения «Уральские локомотивы», заменяет по всей сети железных дорог России, устаревшие электровозы ВЛ10в/и и ВЛ11в/и. «Синара» – это передовой, отвечающий современным вызовам электровоз, работающие на постоянном токе и имеющие коллекторный тяговый привод. Обновленные локомотивы серии ЭС6 в настоящее время выпускается как в двухсекционном исполнении, так и в трех- и четырехсекционном – с дополнением для увеличения мощности, в виде одной или двух бустерных секции соответственно. Также у данных электровозов продлено действие сертификата соответствия ТР ТС на локомотив серии 2ЭС6 «Синара». Все разрешающие документы и сертификаты будут действовать до августа 2026 года включительно [1].

Тяговые испытания Синары с бустерными секциями проводились весной 2021 года на испытательном пути завода «Уральские локомотивы». А сертификационные и приемочные испытания проводились с середины июня по конец августа 2021 года уже непосредственно на экспериментальном кольце ВНИИЖТ г. Щербинка. Затем после итогового заседания межведомственная комиссия подтвердила возможность серийного изготовления на заводе «Уральские локомотивы» электровозов модификации 3ЭС6 и 4ЭС6 [2].

Ввиду сегодняшних реалий по перераспределению грузовых потоков и переориентации транспортных коридоров в Азию, вопрос обновления устаревающего парка на стратегически важных железнодорожных полигонах становится наиболее актуальным [3, 4]. Одним из таких полигонов является Среднесибирский ход, проходящий по территории Республики Казахстан, имеющий сложный профиль пути, по которому, в основном, перевозится каменный уголь.

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА ТРЕХ- И ЧЕТЫРЕХСЕКЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ СЕРИИ ЭС6

Сертификация ЭС6 как в трех- так и четырех-секционном исполнении открывает новые возможности и перспективы для применения данного электровоза при организации движения с поездами повышенной длины и массы. Применение одной такой бустерной секции электровоза позволяет ему водить поезда весом до 8 тысяч тонн со сложным профилем пути более 9 ‰, а с двумя бустерами он может провести состав весом уже 12,5 тысяч тонн с условием применения системы распределения управления тормозами, а именно применение БХВ СУТП», тогда как

двухсекционный электровоз 2ЭС6 способен вести поезд массой 8 тысяч тонн на участках с равнинным профилем пути (до 6 ‰) и поезд массой 5 тысяч тонн на участках с горным профилем (до 10 ‰) [5].

На сегодняшний день завод «Уральские локомотивы» выпустил уже 1284 электровоза 2ЭС6, из них 20 электровозов уже зарегистрированы как 3ЭС6 и 58 электровозов 2ЭС6 приписки депо ТЧЭ-12 Тайга преобразованы в 3-секционный вариант путем добавления бустерной секции электровоза [2].

В локомотивное депо Пермь-Сортировочная Свердловской железной дороги на данный момент уже поступили 9 таких электровозов как 3ЭС6 «Синара» повышенной мощности (с дополнительной бустерной секцией).

Новые машины уже начали заменять электровозы предыдущих серий и водят грузовые поезда с увеличенным весом на главном ходу Транссибирской магистрали, в том числе по участкам со сложным профилем пути в горах Урала.

Свердловская железная дорога стремительно пополняет парк магистральных электровозов с учетом актуальных производственных задач, технологий перевозочного процесса и тяжелых условий эксплуатации. Так, базовые двухсекционные «Синары» на сложных горно-перевальных участках с затяжными подъемами водят грузовые поезда весом 5,1 тысячи тонн, электровозы серии 2ЭС10 «Гранит» – составы «стандартной» весовой нормы 6,3 тысячи тонн. Стоит также отметить, что 2ЭС10 «Гранит» также обладает теми самыми бустерными секциями, однако сохраняет на данный момент название 2ЭС10, история сложилась также как у машин 2ЭС6 в Тайге. Для вождения тяжеловесных поездов (8 тыс. и 9 тыс. тонн) на «главном ходу» – Транссибирской магистрали используют трехсекционные ЭС10 «Граниты». Локомотивы 3ЭС6 занимают промежуточную нишу и водят поезда весом свыше 7 тыс. т [5].

Использование электровозов новой модификации позволяет снизить эксплуатационные расходы за счет повышенной энергоэффективности, увеличения межсервисных пробегов и сокращения внеплановых ремонтов. Гарантийное обслуживание новых машин будут осуществлять специалисты сервисной компании завода-изготовителя, а именно СТМ-сервис на базе депо Пермь-Сортировочная.

По заявлению самого СТМ-сервиса [6] компания уже освоила новый вид ремонта электровозов 3ЭС6 он будет осуществляться в сервисном локомотивном депо «Пермь-Сортировочная». В компетенции депо входит обслуживание локомотивов данной серии в объеме ТР-30 и техническое обслуживание ТО-2.

Для освоения ремонта локомотивов серии 3ЭС6 на базе сервисного локомотивного депо «Пермь-Сортировочная» проводились работы по обучению персонала, дооснащению участков депо технологическим и стендовым оборудованием, укомплектованию необходимым

инструментом, а также модернизации существующих систем экипировки и ремонтных эстакад депо.

На сегодняшний день в парке депо «Пермь-Сортировочная» 288 секций электровозов серии ВЛ11 и ВЛ11М, что составляет 96,8 % и 9 единиц ЗЭС6 – 3,2 % от общего парка локомотивов компании (Рис.1).

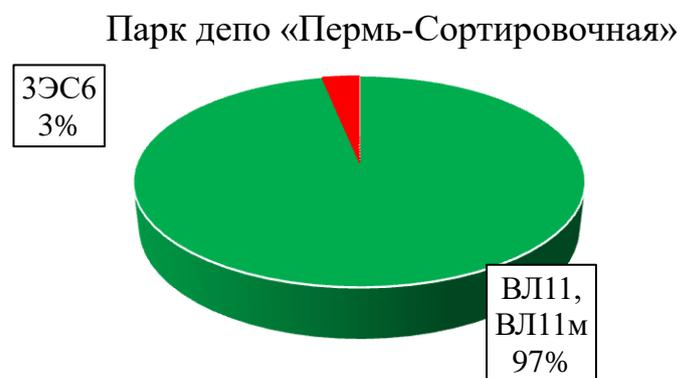


Рис. 1. Круговая диаграмма локомотивного парка депо «Пермь-Сортировочная»

Электровозы ЗЭС6 превосходят электровозы серии ВЛ10 и ВЛ11 различных модификации по целому ряду параметров. В частности:

- по мощности часового режима на 31,8 %;
- по силе тяги часового режима на 32,3 %;
- по мощности продолжительного режима на 40,4 %;
- по силе тяги продолжительного режима на 49 %;
- по мощности рекуперативного тормоза на 32,9 %.

Анализ и сравнение тяговых характеристик электровозов 2ЭС6 и ЗЭС6, приведены в (Табл. 1) [1].

Таблица 1. Технические данные двух- и трех-секционного электровоза серии ЭС6

Технические данные	2ЭС6	3ЭС6
Сила тяги при трогании с места	72 тс	108 тс
Часовая мощность ТЭД	6440 кВт	9660 кВт
Сила тяги часового режима	47,3 тс	70,95 тс
Длительная мощность ТЭД	6000 кВт	9000 кВт
Сила тяги длительного режима	42,6 тс	63,9 тс
Сцепной вес	200 т	300 т
Мощность рекуперативного торможения	6600 кВт	8250 кВт
Мощность тормозных реостатов	5500 кВт	8250 кВт

Анализируя сравнение технических данных можно сделать вывод, что мощность трехсекционного электровоза серии ЭС6 в 1,5 раза выше, чем у локомотива в двухсекционном исполнении.

В целом бустерная секция электровоза имеет то же самое электрооборудование и конструкцию экипажной части, что и головная, и отличается от нее главным образом отсутствием кабины управления, а также наличием второй торцевой стены с межсекционным переходом вместо неё. Это обеспечивает удобство при работе по сравнению со сцепом ЭС6+2ЭС6 из трёх головных секций, позволяя локомотивной бригаде переходить между всеми секциями в процессе движения, что позволяет осматривать всё оборудование и выявлять возможные неисправности без необходимости остановки поезда. Масса 100 тонн и длина 17 метров бустерной секции такая же, как и у головной.

## АНАЛИЗ ТЯГОВЫХ ПЛЕЧ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В настоящее время электровозы 3ЭС6 используются на участках со сложным профилем пути. Сравнивая профиль железнодорожных участков Урало-Сибирского полигона: Березники – Пальники Свердловской железной дороги (Рис. 2) и Тайга – Томск1 Западно-Сибирской железной дороги (Рис. 3) с профилем пути железнодорожного участка Петропавловск – Кондратовка Южно-Уральской железной дороги (Рис. 4) можно констатировать о значительной разнице технических условий эксплуатации. А именно: подъемы и спуски на участке Березники – Пальники и Тайга – Томск1 достигают 15 ‰ и более. Участок обладает затяжными подъемами и спусками с множеством кривых в отличие от участка Петропавловск – Омск, где подъемы и спуски не превышают значения в 5 ‰ [7].

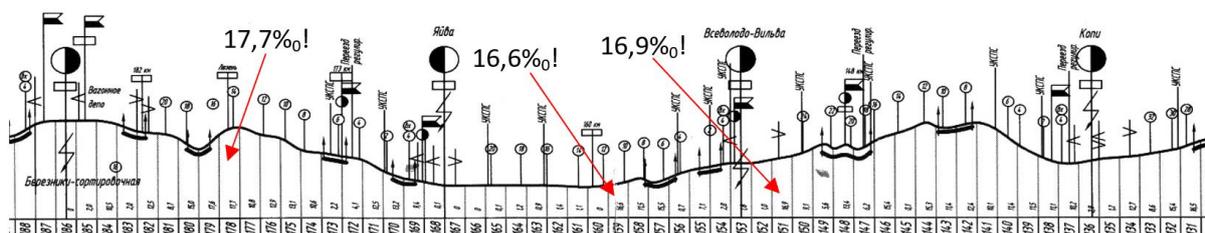


Рис. 2. Профиль пути участка Березники – Пальники  
Свердловская железная дорога

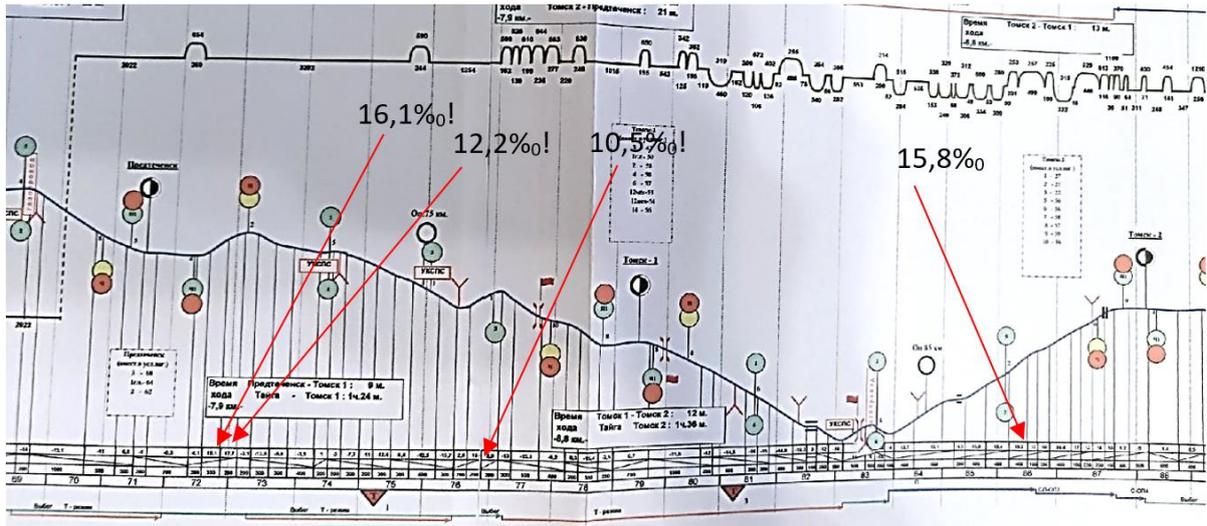


Рис. 3. Профиль пути на участке Тайга – Томск1

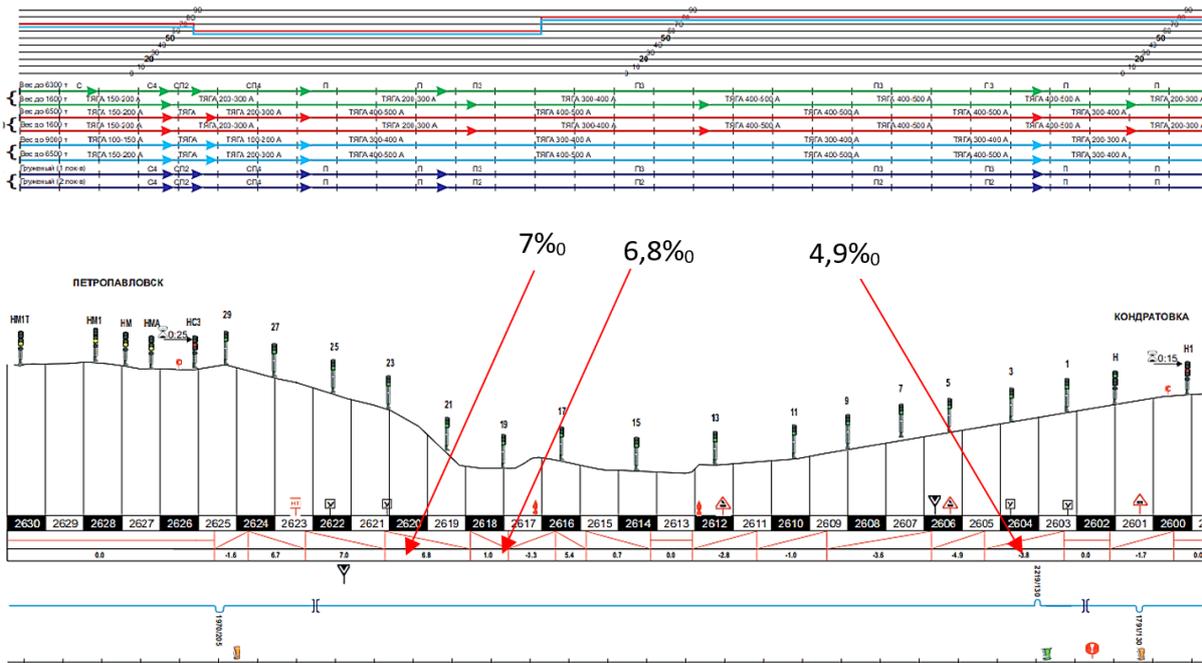


Рис. 4. Профиль пути на перегоне Петропавловск – Кондратовка

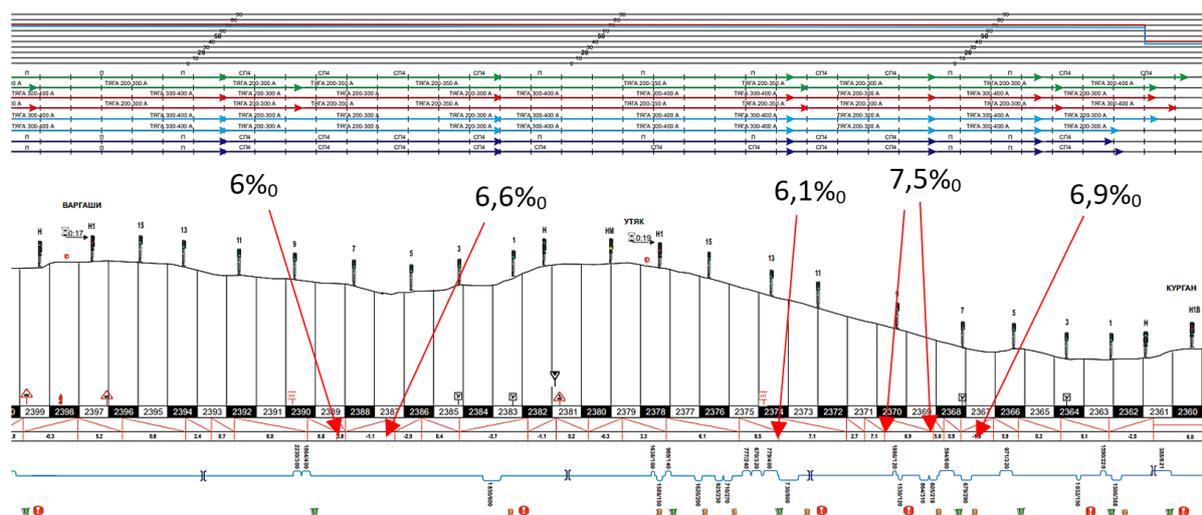


Рис. 5. Профиль пути на перегонах Варгаши – Утяк – Курган

Из анализа профиля пути тяговых плеч Урало-Сибирского железнодорожного полигона можно сделать вывод, что наиболее оптимальным, для использования электровоза ЗЭС6, является западное тяговое плечо локомотивного депо Петропавловск. Тяговое плечо Варгаши – Утяк – Курган (Рис. 5) обладающее затяжными подъемами и спусками более 5 % с множеством кривых в отличии все от того же тягового плеча Петропавловск – Омск [8].

Оценивая достоинства и недостатки внедрения в эксплуатацию на участках Среднесибирского хода Урало-Сибирского железнодорожного полигона электровозов ЗЭС6, можно сделать следующие выводы:

#### Достоинства

- увеличение количества перевозимого груза;
- перспектива удлинение тяговых плеч;
- возможность вождения тяжеловесных поездов более 8 тыс. тонн без применения системы многих единиц;
- экономия электроэнергии благодаря меньшему потреблению электрической энергии тяговыми двигателями при трогании и разгоне;
- экономия и сбережение срока службы тяговых электродвигателей и электровоза в целом, т.к. уменьшается нагрузка на ТЭД при движении с тяжеловесным составом;
- наиболее эффективная работа рекуперации;
- нерасцепные секции что увеличивает безопасность движения, в том плане что локомотивная бригада может перемещаться по всем секциям электровоза, в отличии от электровозов в системе многих единиц. Также не забыта катастрофа на перегоне Ерал – Симская летом 2011 года, когда локомотивная бригада отправилась с

перекрытыми тормозными рукавами между локомотивами по системе многих единиц (СМЕ) [9]. В электровозе 3ЭС6 такой фактор исключен, так как электровоз един и не расцепляется.

### **Недостатки**

- уменьшение занятости локомотивных бригад из-за исключения сдвоенных поездов по перспективе замены сдвоенных поездов движущихся по системе автоматического ведения поезда (САВП), один электровоз 3ЭС6 место двух электровозов 2ЭС6;
- не использование полной мощности электровоза 3ЭС6 на участках Урало-Сибирского железнодорожного полигона с умеренным профилем пути. Особенно можно выделить участок Омск – Петропавловск, как показал анализ профиля пути, данный участок имеет довольно равнинный профиль пути, который включает в себя лимитирующие уклоны, которые не превышают значения в 5 ‰. На указанном тяговом плече рационально использовать электровозы 2ЭС6. Однако, на участках рассматриваемого полигона Петропавловск – Курган – Челябинск с профилем, имеющим лимитирующие уклоны 8–9 ‰, ведение поездов тяговыми усилиями электровоза 3ЭС6 будет востребовано, так как в настоящее время на данном участке тяжеловесные поезда ведут по СМЕ;
- появление в электровозе бустерной секции увеличивает длину электровоза, что влечет за собой увеличение места, занимаемого локомотивом на тракционных путях депо, 2ЭС6 занимает 34 м, 3ЭС6 занимает 51 м (Рис. 6);
- возникают сложности по реализации вождения сдвоенных поездов без ведомого электровоза. Это объясняется: при прибытии на стоянку на промежуточную станцию, на которой при ведении сдвоенного поезда, осуществлялась расцепка поезда – ведущий заходит на один путь, ведомый на другой; поезд с ведущим локомотивом 3ЭС6 не вместится в парк приема, длина которого 1604 м (Рис. 7), а длина сдвоенного поезда в среднем 2150 м и более (Рис. 8), однако на станции Петропавловск есть возможность приема таких поездов (Рис. 8);
- переоснащение ремонтных и сервисных локомотивных депо и повышение квалификации работников по ремонту данных электровозов.

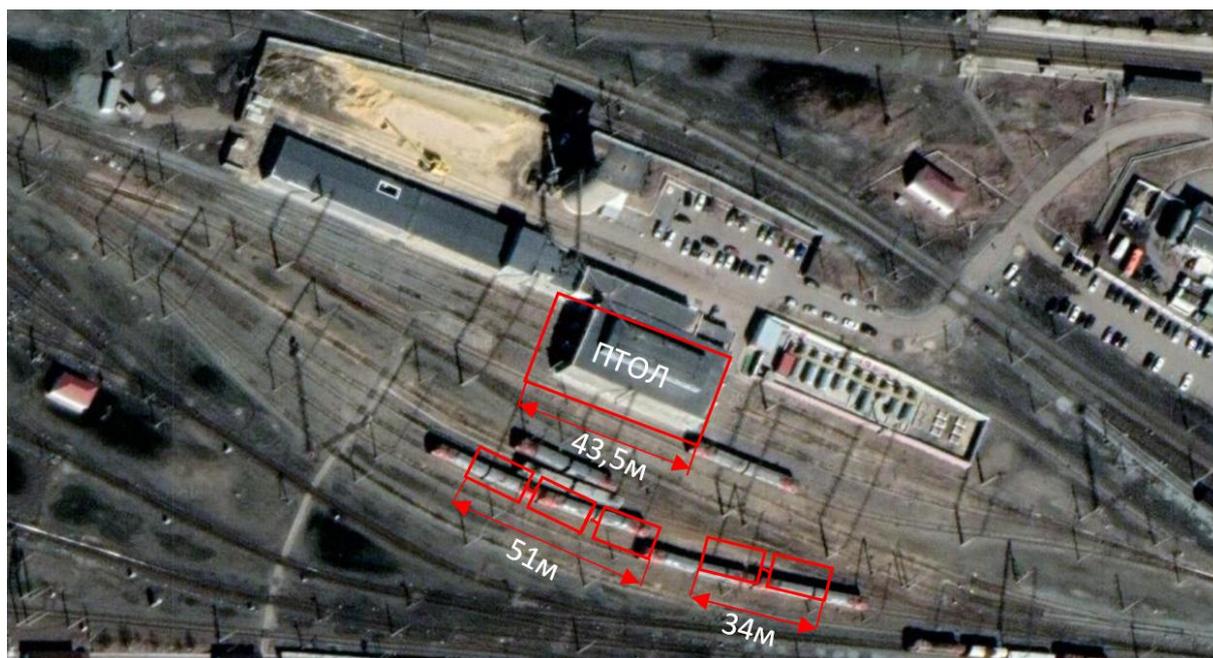


Рис. 6. Схематичное расположение электровоза 2ЭС6 и 3ЭС6 на ПТОЛ станции Входная



Рис. 7. Место приемки сдвоенных поездов станция Входная



Рис. 8. Место приемки сдвоенных поездов в нечетном парке, станция Петропавловск, сдвоенный поезд

На Рис. 6 видно, что под трехсекционный электровоз требуется больше места, что усложнит расстановку данных электровозов на тракционных путях сервисного локомотивного депо. А полная постанровка электровоза на стойла пункта технического обслуживания локомотивов

(ПТОЛ) станции Входная для проведения обслуживания также невозможна из-за длины ПТОЛ равной 43,5 м (Рис. 6). Однако на станции Петропавловск, длина ПТОЛ составляет 85,3 м, что идеально подходит для постановки данных локомотивов на обслуживание (Рис. 9.).



Рис. 9. Схематическое расположение электровоза 3ЭС6 на ПТОЛ станции Петропавловск

На Рис. 9 показано, что на территории ПТОЛ и на тракционных путях станции Петропавловск можно разместить более 5 электровозов серии 3ЭС6 одновременно.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПТОЛ ПРИ ПОМОЩИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для определения требуемых технических параметров ПТОЛ было использовано российское программное обеспечение E2 (разработанный компанией Aurap [10]) для создания графическо-физических 3D моделей электровоза 3ЭС6 и станции Петропавловск.

Разработка 3D-моделей является довольно трудозатратным процессом, который требует большого количества фотоматериала, чертежей, времени и навыков от разработчика. Для создания 3D-моделей потребовался начальный материал – чертежи и схемы, которые отображали геометрию модели для непосредственного создания самой графическо-физической модели объекта [11]. Чертежи позволили определить внешний вид, размеры высоты и ширины объекта (Рис. 10), которые являются основополагающими метриками для программного обеспечения E2 [12–15].

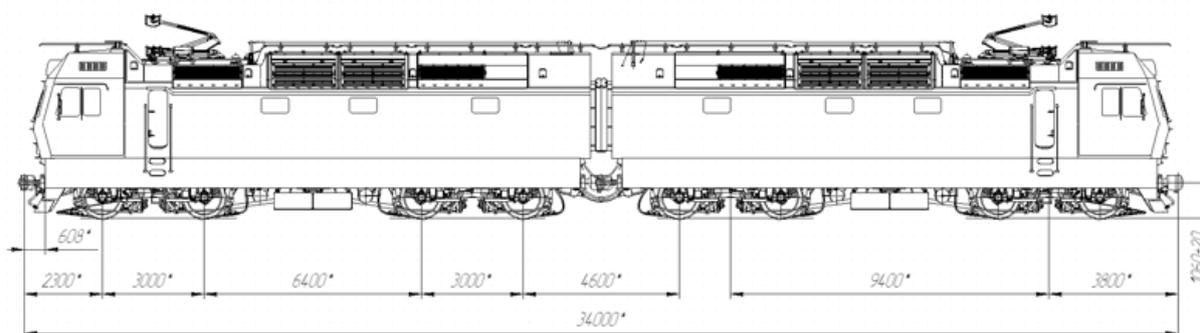


Рис. 10. Чертеж электровоза 2ЭС6 «Синара»

При создании имитационной модели станции и ПТОЛ учитывались её реальные параметры, которые были определены с помощью масштабности спутниковой карты открытого доступа Google, а также из фотоматериала личных архивов (Рис. 11).

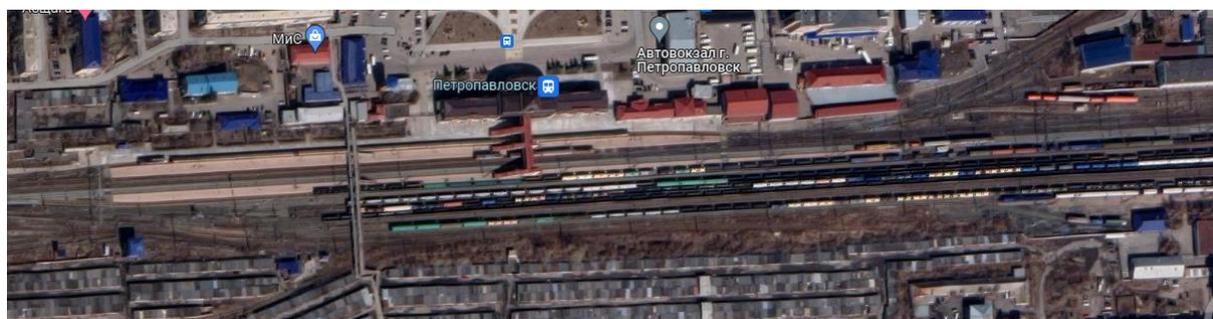


Рис. 11. Вид на вокзал станции Петропавловск со спутниковых карт Google Maps

При создании графическо-физической модели объекта были учтены следующие критерии:

- размерность физических объектов определялась в метрах, так как работать в программном обеспечении E2 возможно только с этой единицей измерения;
- при рассмотрении вопроса о создании модели в миллиметрах, для более корректного отображения результата выявлено, что при графическом экспортировании объекта он не соответствует заданным размерным параметрам и отображается с нарушениями физических величин. Этот процесс описывается как потеря ограничивающих рамок (Bounding Box), то есть когда модель теряется в пространстве из-за потери тех самых рамок;
- для отображения цветовых параметров необходимо использовать текстурный и фотоматериал;
- использование личного kuid (личный номер автора) является обязательным требованием для полноценного использования возможностей программного обеспечения E2.

Важно отметить, что процесс текстурирования считается важным шагом в создании графическо-физической модели, для получения текстурного материала можно воспользоваться фототекстурами будущей модели либо совершить покраску при помощи специализированных программных продуктов для создания текстур, для этого использовалось программное обеспечение Substance Painter, которое позволяет интегрировать результат в сторонние программные комплексы [15].

Графическо-физическая модель электровоза создавалась в программно-компьютерной среде 3Ds max 2012 и 3Ds max 2022. С 2019 года в программном комплексе Auran появилась поддержка моделей формата FBX что позволило отказаться от скрипт-экспорта, который использовался в 3Ds max 2012 и раньше, а также данный формат позволил использовать новый вид текстур PBR. Следовательно, можно использовать ранние версии 3Ds max и новые, например – 3Ds max 2022. На Рис. 12 представлены этапы создания модели электровоза для дальнейшего имитационного моделирования [16].



а) Определение примитивов физической модели



б) Утверждение графического изображения

Рис. 12. Этапы создания 3D-модели электровоза серии ЭС6 «Синара»

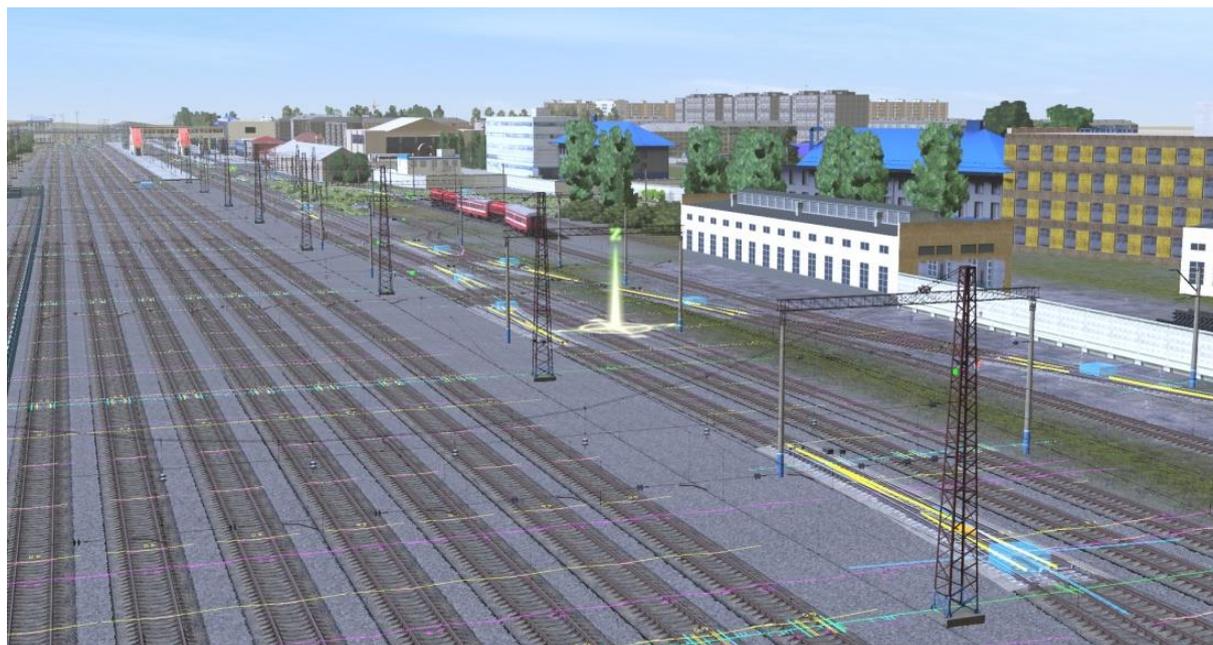
Для итогового создания графическо-физической имитационной модели электровоза 2ЭС6 и 3ЭС6 использовались чертежи (Рис. 10), на основе которых в программном комплексе были определены примитивы модели. К основным примитивам относятся: треугольник; квадрат; круг и т.п. Также в процессе моделирования использовался полигональный способ. Данный способ позволяет строить геометрию разрабатываемой модели на основе дублирования ребра полигона физических параметров. С помощью чертежей были смоделированы основные узлы электровоза серии ЭС6: тележки; колесные пары; электрическое оборудование (токоприемник, токоведущие шины, шунты, аккумуляторная батарея).

Для точного определения поместится ли электровоз в трехсекционном исполнении на ПТОЛ станции Петропавловск, необходимо было создать точную копию станции Петропавловск, для этого необходимо было учесть реальные размеры всей станционной инфраструктуры (Рис. 11).

Для расстановки светофоров использовался технико-распределительный акт станции Петропавловск, на котором расположены светофоры и стрелочные переводы с их названиями [11]. Чтобы сохранить реальный масштаб в процессе создания использовались линейки, которые встроены в графическо-физический программный комплекс E2 и имеют функцию масштабирования. Изначально определялись размерные параметры на спутниковой карте, а после в переносились в графическую модель. То есть каждое дерево или каждый дом стоит там, где он фактически находится в реальности. Аналогично проектировалась контактная сеть. Она изображалась при помощи специальной растягиваемой линейки длиной 60 метров (Рис. 13).



а) Графическое создание инфраструктуры станции



б) Графическое создание средств централизации и блокировки

Рис. 13. Определение технических параметров станции

Таким образом была создана имитационная 3D-модель объектов: станции Петропавловск и двух- и трехсекционных электровозов серии ЭС6 «Синара». Имитационное моделирование позволило произвести оценку постановки электровоза на ПТОЛ станции Петропавловск. Определено, что приемо-отправочные пути станции Петропавловск и тракционные пути ПТОЛ в действительности могут разместить как одиночные, так и с поездом электровозы ЗЭС6 (Рис. 14).



Рис. 14. Расположение электровоза ЗЭС6 на ПТОЛ станции Петропавловск при имитационном моделировании

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКА НА ОСНОВЕ ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ВНЕДРЕНИЮ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ЭЛЕКТРОВЗОВ ЗЭС6

Для проведения анализа предполагаемой технико-экономической эффективности при организации перевозочного процесса на участках Урало-Сибирского железнодорожного полигона на основе внедрения в эксплуатацию электровозов ЗЭС6 была изучена расшифровка параметров движения указанного локомотива с поездом на рассматриваемых участках [17].

На Рис. 15 изображена расшифровка записывающего устройства регистратора параметров движения поезда и автоведения (карта РПДА) электровоза 2ЭС6 «Синара» на участке Московка – Петропавловск.

Изучив параметры участков эксплуатации электровоза можно сделать вывод, что лимитирующие уклоны наблюдаются на перегоне Московка – Карбышево I при движении по обводному пути от города Омска, в остальном же профиль достаточно единообразный без подъемов и спусков.

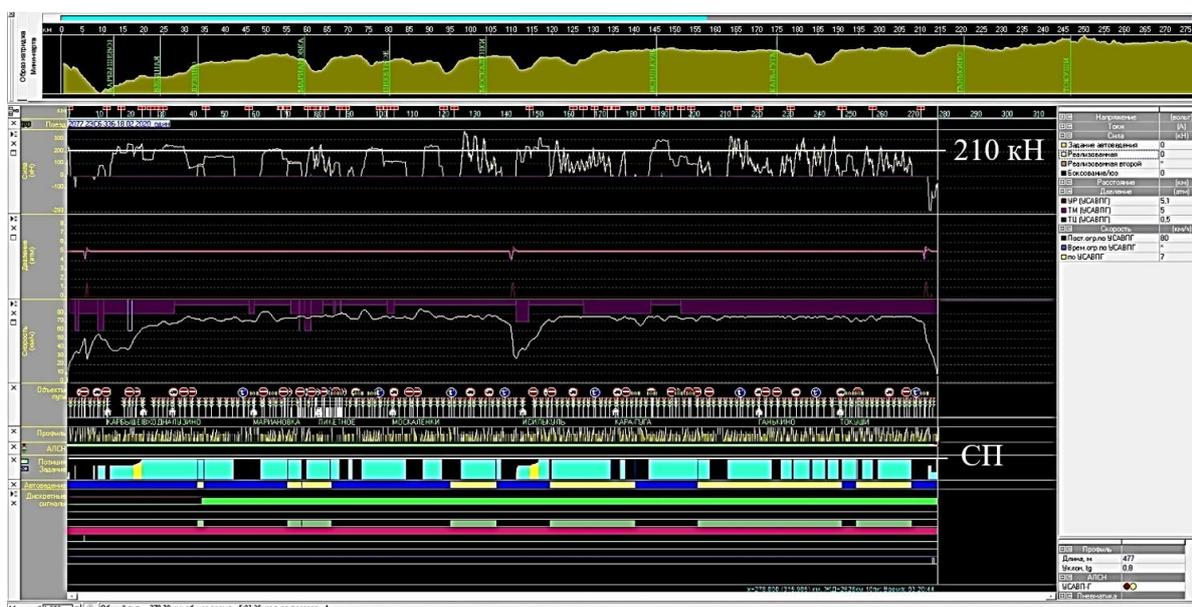


Рис. 15. Анализ карты РПДА электровоза 2ЭС6-336  
на участке Московка – Петропавловск

При анализе параметров поездки выявлено, что сила тяги, без учета остановок, разгонов и замедлений, находилась в диапазоне от 175 до 210 кН, а тяговые электрические двигатели (ТЭД) находится на ходовой позиции в режиме серийс-параллельного (СП) соединения. На электровозах ЗЭС6 возможно поддерживать подобные параметры движения при заданной силе тяги, при этом ТЭД будут находится на

ходовой позиции серийного (С) соединения благодаря большей мощности, что обеспечивает энергоэффективные режимы ведения поезда, а также снятие нагрузки с блока пуско-тормозных резисторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований и выполненного компьютерного имитационного моделирования поездной обстановки свидетельствуют об эффективности применения в эксплуатации электровозов 3ЭС6 на Урало-Сибирском железнодорожном полигоне. Наиболее подходящими для эксплуатационной работы таких электровозов являются тяговые плечи Петропавловск – Курган – Челябинск, которые имеют II и III типовые профили пути. Инфраструктура приемо-отправочных станций, тракционных путей сервисных локомотивных депо позволяет проводить по названным участкам поезда повышенной массы и длины ведущим одним электровозом 3ЭС6 и их полноценное техническое обслуживание.

В рамках дальнейшего исследования перспектив использования в эксплуатации на рассматриваемых участках электровозов 3ЭС6 необходимо произвести расчет технико-экономического обоснования замены парка локомотивов серии ВЛ10 Урало-Сибирского железнодорожного полигона новыми электровозами методом сравнения затрат на приобретение, эксплуатацию и технического обслуживания новых локомотивов по сравнению с затратами по обновлению и содержанию существующего парка электровозов.

### 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. Брексон В.В., Никифорова Н.Б., Струнов А.А. Электровоз 2ЭС6 «Синара» / под ред. В.В. Брексона. – Верхняя Пышма: ООО «Уральские локомотивы», 2015. – 332 с. [Brekson VV, Nikiforova NB, Strunov AA. *Elektrovoz 2ES6 Sinara*. Brekson VV, editor. Verkhnyaya Pyshma: Uralskie lokomotivy; 2015. 332 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 29.12.2022. Доступно по: <https://eva.tools/literatura/re/elektrovoz-2es6-sinara>
2. Уральские локомотивы. [Uralskie lokomotivy. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 29.12.2022. Доступно по: <https://ulkm.ru/actions/uspeshno-zavershilis-ipytaniya-elektrovoza-2es6-s-busternoj-sekciej>
3. Дяо Сюхуа. Экономическое сотрудничество северо-восточного региона Китая и ДВ России в новых условиях: состояние, возможности и предложение // Теоретическая экономика. – 2022. – № 1. – С. 70–78. [Dyao Syukhua.

- Ekonomicheskoe sotrudnichestvo severo-vostochnogo regiona Kitaya i DV Rossii v novykh usloviyakh: sostoyanie, vozmozhnosti i predlozhenie. *Teoreticheskaya ekonomika*. 2022;1:70-78. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 29.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48179855>
4. Khokhrina OI. Kuzbass-2035: the territory as a driver of economic growth. *World of Economics and Management*. 2020;20(4):61-77. doi.org/10.25205/2542-0429-2020-20-4-61-77
  5. Об утверждении Инструкции по организации обращения грузовых поездов повышенной массы и длины на железнодорожных путях общего пользования ОАО «РЖД». Утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 01.09.2016 № 1799р. Режим доступа: <https://base.garant.ru/77674057/>. Дата обращения: 17.10.2022. [Ob utverzhdanii Instruksii po organizatsii obrashcheniya gruzovykh poezdov povyshennoy massy i dliny na zheleznodorozhnykh putyakh obshchego polzovaniya JSC "Russian Railways". Utverzhdeno rasporyazheniem JSC "Russian Railways" ot 01.09.2016 № 1799r. Available from: <https://base.garant.ru/77674057/>. (In Russ.)].
  6. Кичигин А. Результат с опорой на традиции // Газета «Гудок». – 30 апреля, 2021. [Kichigin A. Rezultat s oporoy na traditsii. *Gazeta "Gudok"*. 2021 April 30. (In Russ.)].
  7. Режимные карты вождения грузовых поездов электровозами эксплуатационного локомотивного депо Тайга. Западно-Сибирская дирекция тяги. – Новосибирск: ДТ ЗС, 2016. – 246 с. [*Rezhimnye karty vozhdeniya gruzovykh poezdov elektrovozami ekspluatatsionnogo lokomotivnogo depo Tayga. Zapadno-Sibirskaya direktsiya tyagi*. Novosibirsk: DT ZS; 2016. 246 p. (In Russ.)].
  8. Режимные карты вождения грузовых поездов электровозами эксплуатационного локомотивного депо Петропавловск. Южно-Уральская дирекция тяги. – Челябинск: ДТ ЮЖУ, 2016. – 212 с. [*Rezhimnye karty vozhdeniya gruzovykh poezdov elektrovozami ekspluatatsionnogo lokomotivnogo depo Petropavlovsk. Yuzhno-Uralskaya direktsiya tyagi*. Chelyabinsk: DT YuzhU; 2016. 212 p. (In Russ.)].
  9. Щербаков М. Две судьбы под откос // Газета «Гудок». – 03 октября, 2011. [Shcherbakov M. Dve sudby pod otkos. *Gazeta «Gudok»*. 2011 October 03. (In Russ.)].
  10. TrainzWiki. [Internet]. Essen: N3V Games; [cited 12 July 2022] Available from [https://online.ts2009.com/mediaWiki/Main\\_Page](https://online.ts2009.com/mediaWiki/Main_Page)
  11. Горелик А.А. Самоучитель 3Ds Max. СПб: БХВ-Петербург, 2018. [Gorelik AA. *Samouchitel 3Ds Max*. St. Peterburg: BKhV-Peterburg; 2018. (In Russ.)]. Доступно по: [https://www.ibooks.ru/products/356705?category\\_id=12312](https://www.ibooks.ru/products/356705?category_id=12312) Ссылка активна на: 29.12.2022.
  12. Ерсултанова З.С., Сатмаганбетова Ж.З., Жиенбаева А.А. Особенности применения среды 3D STUDIO MAX для сеточного моделирования трехмерных объектов // Вестник Костанайского государственного педагогического университета имени Умирзака Султангазина. – 2020. – №1(57). – С. 55–62. [Ersultanova ZS, Satmaganbetova ZhZ, Zhienbaeva AA. Osobennosti primeneniya sredy 3D STUDIO MAX dlya setochnogo modelirovaniya trekhmernykh obektov. *Vestnik Kostanayskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni Umirzaka Sultangazina*. 2020;1(57):55-62. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42478225> Ссылка активна на: 29.12.2022.
  13. Потапкин А.П., Кучвальский Д.С. 3D studio MAX. – М.: Эком, 2017.

- [Potapkin AP, Kuchvalskiy DS. *3D studio MAX*. Moscow: Ekom, 2017. (In Russ.)].  
Доступно по: <https://www.libex.ru/detail/book173474.html> Ссылка активна на:  
29.12.2022.
14. Тонкости настройки и работы в 3ds max / под ред. А.П. Водолазской. – М.: НТ Пресс, 2014. – 1072 с. [Vodolazskaya AP, editors. *Tonkosti nastroyki i raboty v 3ds max*. Moscow: NT Press, 2014. 1072 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на:  
29.12.2022. Доступно по: <https://chaconne.ru/product/2399728>
  15. Aly MHF, Hameda H, El-sayed MA. Computer applications in railway operation. *Alexandria Engineering Journal*. 2016;55(2):1573-80. doi: 10.1016/j.aej.2015.12.028
  16. Шнейдеров В.Л. Иллюстрированный самоучитель 3ds max. СПб: Питер, 2013. [Shneyderov VL. *Illyustrirovannyy samouchitel 3ds max*. St. Petersburg: Piter, 2013. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 29.12.2022. Доступно по: <https://www.labirint.ru/books/88765>
  17. Отчетные данные о поездной работе магистральных грузовых электровозов эксплуатируемых на участках Урало-Сибирского полигона Западно-Сибирской железной дороги за 2020–2021 гг. от 28.03.2022 г. № Исх-1610/ЗСиб Т / Западно-Сибирская дирекция тяги. – Новосибирск: ДТ ЗС, 2022. – 26 с. [*Otchetnye dannye o poezdnoy rabote magistralnykh gruzovykh elektrovozov ekspluatiruemykh na uchastkakh Uralo-Sibirskogo poligona Zapadno-Sibirskoy zheleznoy dorogi za 2020 – 2021 gg. ot 28.03.2022 g. № Iskh-1610/ZSib T / Zapadno-Sibirskaya direktsiya tyagi*. Novosibirsk: DT ZS; 2022. 26 p (In Russ.)].

#### Сведения об авторах:

**Доманов Кирилл Иванович**, канд. техн. наук;

Тел: +7(923) 671-45-33

eLibrary SPIN: 4153-0463; ORCID: 0000-0002-2627-4179;

E-mail: dki35@ya.ru

**Богун Вадимович**;

eLibrary SPIN: 5829-8716; ORCID: 0000-0003-4084-354X;

E-mail: kbogunov@mail.ru

#### Information about the authors:

**Kirill I. Domanov**, Ph.D. of Engineering Sciences;

eLibrary SPIN: 4153-0463; ORCID: 0000-0002-2627-4179;

E-mail: dki35@ya.ru

**Kirill V. Bogunov**;

eLibrary SPIN: 5829-8716; ORCID: 0000-0003-4084-354X;

E-mail: kbogunov@mail.ru

#### Цитировать:

Доманов К.И., Богун В.В. Эффективность эксплуатации электровозов 3ЭС6 на Урало-сибирском полигоне // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 1. – С. 64–82. doi: 10.17816/transsyst20239164-82

#### To cite this article:

Domanov KI, Bogunov KV. Efficiency of operation of 3ES6 electric locomotives at the Ural-Siberian polygon. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):64-82. doi: 10.17816/transsyst20239164-82

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

УДК [UDC] 621.314.212:620.111.3  
DOI 10.17816/transsyst20239183-94

© А.В. Горлов, М. А. Волчанина, А. В. Пономарев, А. А. Кузнецов  
Омский государственный университет путей сообщения  
(Омск, Россия)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РАЗРЯДОВ В МАСЛЕ НА ИМИТАТОРЕ С РАЗЛИЧНЫМ НАБОРОМ ДЕФЕКТОВ

**Обоснование:** В статье приведено описание устройства имитации различных дефектов изоляции для совместного использования с приборами акустического контроля силовых трансформаторов, входящих в систему электроснабжения железнодорожного транспорта. Приведены параметры зарегистрированных сигналов имитатора, которые позволят распознавать различные дефекты изоляции при диагностировании силовых трансформаторов в условиях эксплуатации, что позволит избежать аварийных режимов и перебоев в работе электроподвижного состава железных дорог.

**Цель:** экспериментальные исследования имитатора с различным набором дефектов, получение значений параметров сигналов акустического контроля для различных дефектов изоляции силовых трансформаторов.

**Материалы и методы:** экспериментальные исследования автоматизированных средств акустического контроля, разработка технических средств для имитации различных дефектов изоляции силовых трансформаторов, обработка сигналов акустического контроля.

**Результаты:** приведена структурная схема имитатора с различным набором дефектов, приведены значения параметров сигналов акустического контроля различных дефектов изоляции силовых трансформаторов.

**Заключение:** приведенное устройство позволяет воспроизводить различные дефекты изоляции силовых трансформаторов, распознавать подобные дефекты по предложенным параметрам сигналов акустического контроля.

**Ключевые слова:** силовые трансформаторы, электроснабжение железных дорог, дефекты изоляции, частичные разряды, акустический контроль, имитатор дефектов.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS  
Field – Electrotechnical complexes and systems

© A.V. Gorlov, M.A. Volchanina, A.V. Ponomarev, A.A. Kuznetsov  
Omsk State Transport University  
(Omsk, Russia)

## INVESTIGATION OF HIGH-VOLTAGE DISCHARGE IN OIL ON A SIMULATOR WITH A DIFFERENT SET OF DEFECTS

**Background:** The article describes a device for simulating various insulation defects for use with acoustic control devices for power transformers included in the power supply system of railway transport. The parameters of the recorded signals of the simulator are given, which will make it possible to recognize various insulation defects when diagnosing power transformers under operating conditions which will help to avoid emergency modes and interruptions in the operation of the electric rolling stock of railways.

**Aim:** experimental studies of a simulator with a different set of defects, obtaining the values of the parameters of acoustic control signals for various defects in the insulation of power transformers.

**Methods:** experimental studies of automated means of acoustic control, development of technical means for simulating various defects in the insulation of power transformers, processing of acoustic control signals.

**Results:** the block diagram of the simulator with a different set of defects is given, the values of the parameters of acoustic monitoring signals for various defects in the insulation of power transformers are given.

**Conclusion:** the above device allows you to reproduce various defects in the insulation of power transformers, to recognize such defects according to the proposed parameters of acoustic control signals.

**Key words:** power transformers, railway power supply, insulation defects, partial discharges, acoustic diagnostics, defects simulator.

## ВВЕДЕНИЕ

Силовые трансформаторы (СТ) представляют собой один из основных элементов системы электроснабжения железных дорог, ввиду этого выявление предаварийных состояний СТ является актуальной задачей [1]. В процессе эксплуатации СТ необходимо обеспечивать его работоспособное состояние и предупреждать возможный выход из строя по причине быстроразвивающихся дефектов [2–4]. Состояние изоляции внутри маслонаполненного бака, как одного из определяющих параметров, напрямую связано с техническим состоянием силового трансформатора. Ухудшение изоляции в баке СТ происходит по причине механических, термических и электрических нагрузок [5, 6]. Воздействие повышенных нагрузок приводит к изменению теплового режима, возникновению и развитию разрядных процессов внутри изоляции СТ [7–10]. Разрядные процессы, как правило, развиваются постепенно во времени. Ввиду отсутствия технического обслуживания, первичные частичные разряды (ЧР), возникающие в твердой изоляции могут переходить в искровые разряды, и в дальнейшем данная деградация может приводить к дуговым разрядам, последствия которых могут быть необратимыми, и обязательно сопровождаются существенными материальными и временными потерями для ОАО «РЖД» [1].

Для недопущения описанных аварийных режимов работы, существуют, разрабатываются и функционируют различные методики диагностирования, в том числе направленные на определение состояния

изоляции СТ. Основным применяемым на сегодняшний день методом диагностирования является хроматографический анализ газов, растворенных в трансформаторном масле, имеющий определенные недостатки – трудоемкость и длительность процесса диагностирования. Недостатки хроматографического анализа позволяют нивелировать метод с использованием акустического контроля развития разрядных процессов в изоляции силовых трансформаторов.

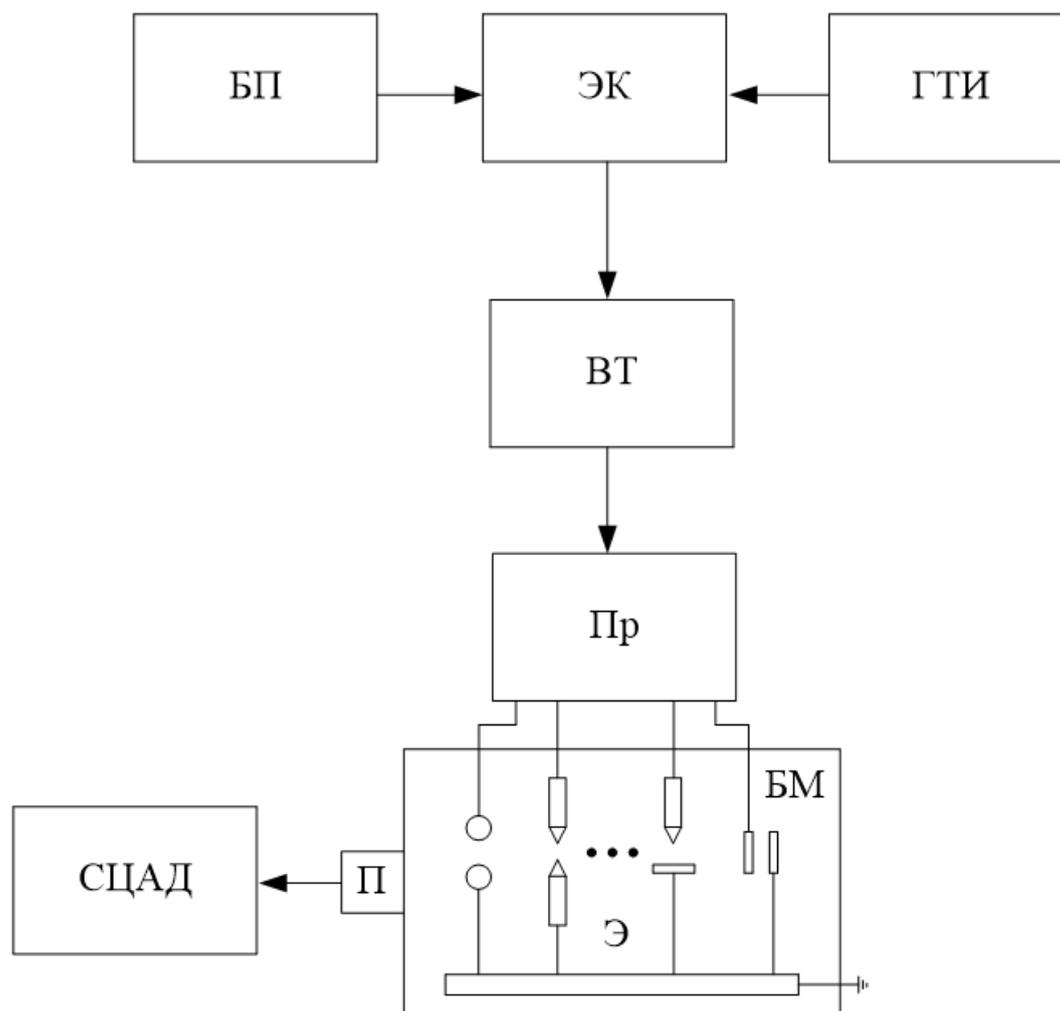
Диагностирование с использованием акустического контроля позволяет регистрировать разрядные процессы внутри изоляции СТ. После регистрации имеется возможность проведения качественного анализа по полученным сигналам с целью определения вида дефекта и степени его развития.

## РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Известно техническое решение [11], основанное на применении имитатора дефектов (ИД) акустического контроля, позволяющее провести снижение дополнительных погрешностей, вызываемых сезонными изменениями температуры, возможным изменением коэффициентов усиления измерительного тракта, и изменениями вязкости трансформаторного масла при проведении диагностирования. В данной работе предлагаются технические решения по совершенствованию метода акустического контроля с применением ИД, который заключается в возможности получения расширенного набора дефектов.

Структурная схема предлагаемого имитатора с различным набором дефектов представлена на Рис. 1.

Принцип действия данной схемы заключается в следующем. Генератор тактовых импульсов (ГТИ) генерирует импульсы низкого напряжения на электронный коммутатор (ЭК), который предназначен для прерывания тока в цепи первичной обмотки высоковольтного трансформатора (ВТ). Блок питания (БП) питает электронный коммутатор (ЭК), а так же вырабатывает импульсы напряжения для первичной обмотки высоковольтного трансформатора (ВТ). Ток высокого напряжения с частотой, вырабатываемой генератором тактовых импульсов (ГТИ), от вторичной обмотки высоковольтного трансформатора (ВТ) подается на один из электродов (Э) различной формы и степени изоляции, который выполняет роль электрического разрядника, выбор которого осуществляется переключателем (Пр). При выборе на переключателе (Пр) электрода определенной формы (Э) происходит выбор определенного вида дефекта.

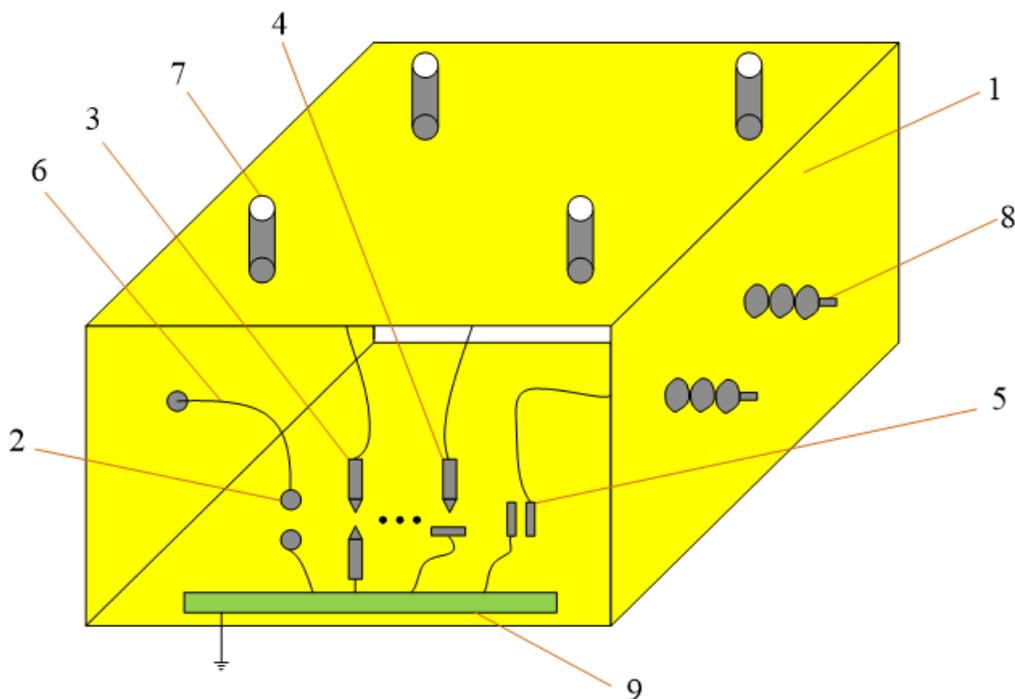


БП – блок питания; ЭК – электронный коммутатор; ГТИ – генератор тактовых импульсов; ВТ – высоковольтный трансформатор;  
СЦАД – система цифровая акустико-эмиссионная диагностическая;  
П – преобразователь акустический; Пр – переключатель;  
Э – электроды; БМ – бак маслонаполненный.

Рис. 1. Структурная схема имитатора с различным набором дефектов

Таким образом, реализуется имитатор с расширенным набором дефектов, сигналы от которого можно сравнивать с сигналами, полученными при акустическом контроле испытуемого силового трансформатора. Работа электрода возможна в различных средах – воздух или трансформаторное масло. Преобразователи акустические (П) предназначены для фиксации ЧР и их преобразования из акустической формы в электрическую. Система цифровой акустической диагностики (СЦАД) предназначена для регистрации электрических сигналов, поступающих от преобразователей акустических (П), их обработке и представлению в цифровой форме [12, 13].

На Рис. 2 показана схема расположения электродов в маслонаполненном баке.



1 – корпус маслонаполненного бака; 2, 3, 4, 5 – электроды, имитирующие различные дефекты; 6 – провод; 7 – преобразователь акустический; 8 – изолятор; 9 – шина заземления.

Рис. 2. Схема расположения электродов в масляном баке

Корпус маслонаполненного бака имитатора с расширенным набором дефектов выполнен из стали, при этом задняя и передняя стенки корпуса являются прозрачными для визуальной регистрации электрических разрядов, как видно по Рис. 2. К корпусу бака подключаются один из двух электродов разрядников различной формы и нулевой потенциал БП.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Электроды различной формы позволяют воспроизвести различные дефекты изоляции, среди которых:

- дефекты металлических проводников различной формы;
- дефекты в изолированных проводниках с нарушением изоляции.

Дефекты металлических проводников различной формы позволяют исследовать разрядные явления в следующих элементах «игла – плоскость» (дефект 1), «шар – шар» (дефект 2), «проводники с нарушенной изоляцией» (дефект 3), «игла – игла» (дефект 4) [14, 15].

Дефекты, описанные выше, можно различать по параметрам сигналов разрядных процессов, зарегистрированных при помощи СЦАД. На Рис. 3–6 приведены осциллограммы нестационарных сигналов, полученные с использованием дефектов 1–4 соответственно.

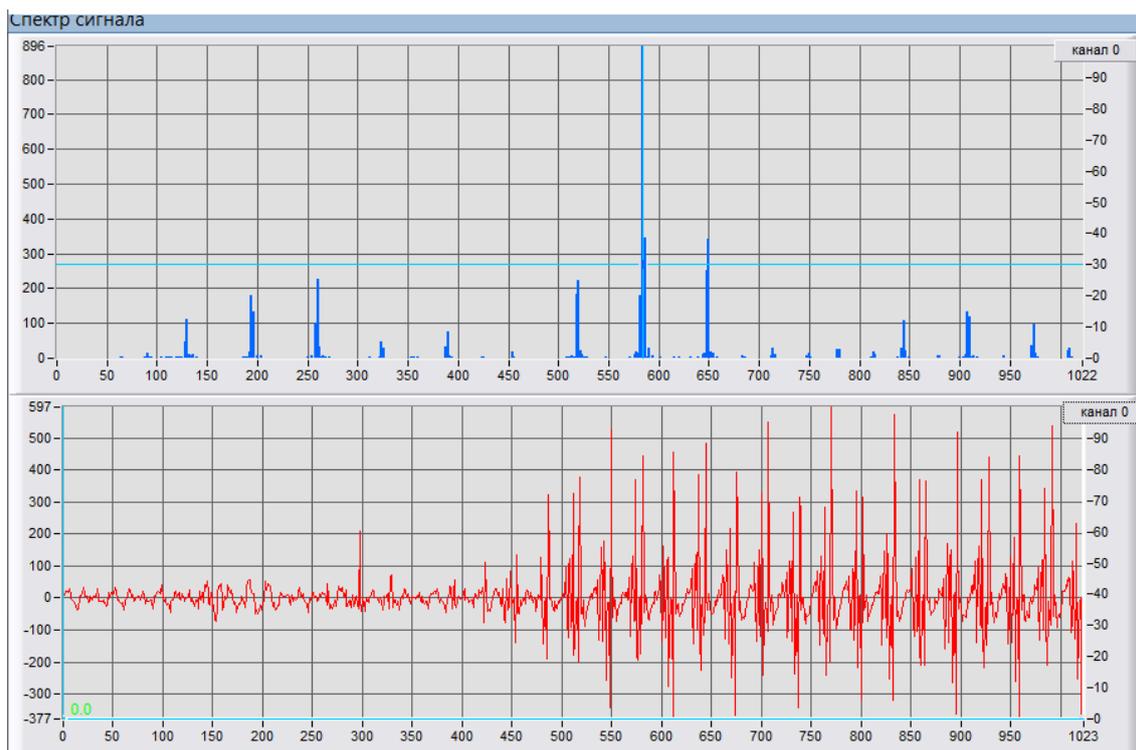


Рис. 3. Осциллограмма нестационарного сигнала полученного с использованием электродов вида «игла – плоскость»

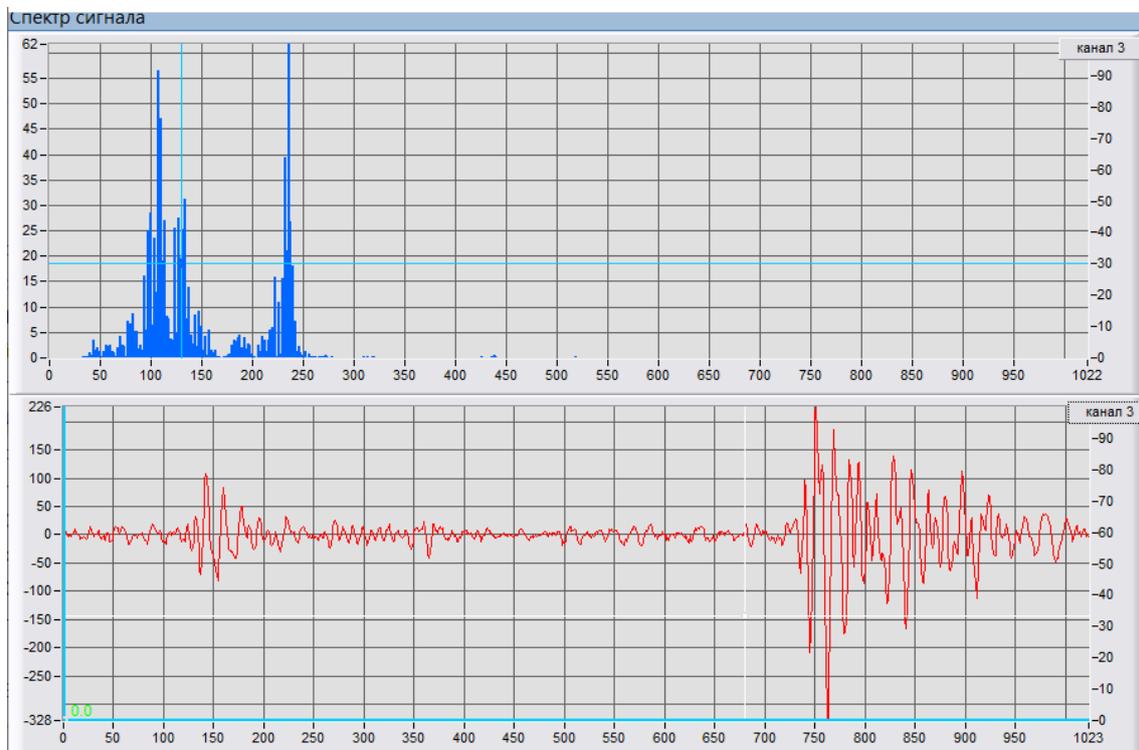


Рис. 4. Осциллограмма нестационарного сигнала полученного с использованием электродов вида «шар – шар»

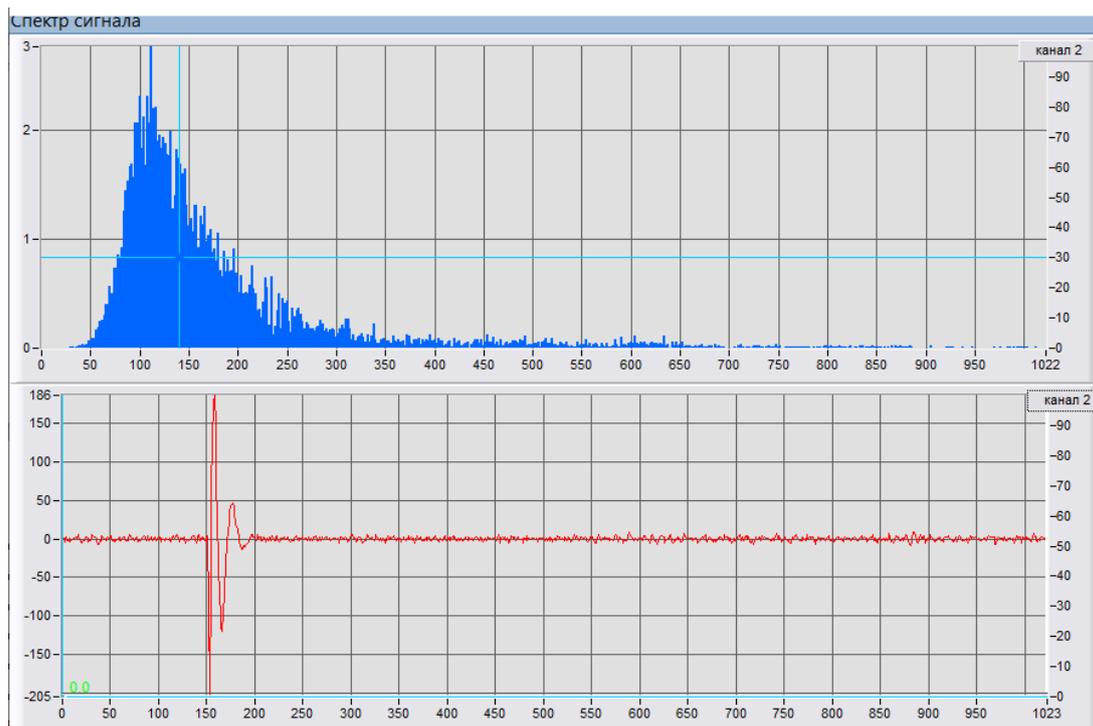


Рис. 5. Осциллограмма нестационарного сигнала полученного с использованием электродов с «нарушенной изоляцией»

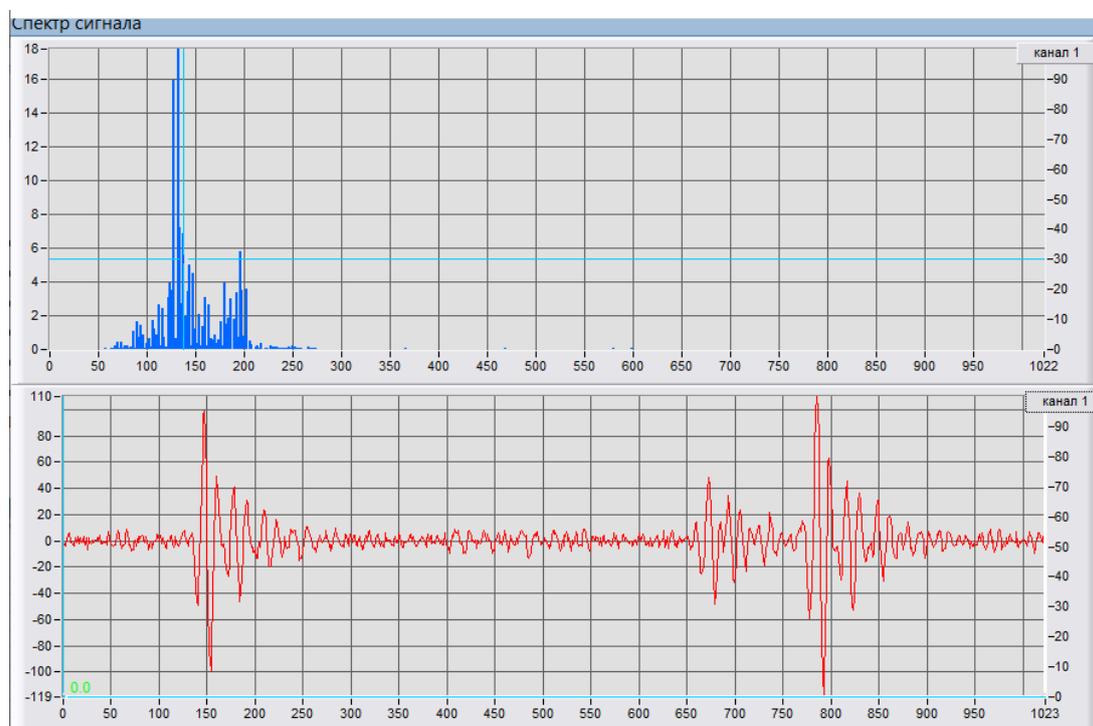


Рис. 6. Осциллограмма нестационарного сигнала полученного с использованием электродов «игла – игла»

Осциллограммы приведены по убыванию мощности разрядов, при одинаковых условиях воздействия на соответствующие электроды. Временные сигналы представлены на нижних графиках Рис. 3–6. По вертикальной оси отложены амплитуды сигналов в единицах АЦП, по горизонтальной – время в мкс.

Для правильного распознавания видов дефектов на силовых трансформаторах необходимо сравнить количественные оценки сигналов, полученных с использованием имитатора дефектов. Ниже приведены параметры, по которым выполнялось сравнение сигналов от различных дефектов.

Параметр  $A_m$  – максимальная амплитуда сигнала в единицах АЦП, определяет мощность разряда. В своем большинстве акустические сигналы, возникающие вследствие электрических разрядов на представленных электродах имеют форму затухающих импульсов, с временем затухания  $T_z$ . Некоторые из них могут иметь интервал нарастания с временем  $T_n$  [16].

Для характеристики формы акустических сигналов в программном обеспечении была использована функция быстрого преобразования Фурье (FFT), представлено на верхних графиках Рис. 3–6. По вертикальной оси отложены амплитуды  $A_m$ , по горизонтальной – частота в кГц. На представленных спектрах выделены доминантные частоты  $F_{d1}$ ,  $F_{d2}$ ,  $F_{d3}$ .

Сводные данные по зарегистрированным сигналам с четырех дефектов приведены в Табл.

*Таблица. Численные значения параметров акустических сигналов для электродов различной формы*

№ деф.	$A_m$ , ед. АЦП	$T_n$ , мкс	$T_z$ , мкс	$F_{d1}$ , кГц	$F_{d2}$ , кГц	$F_{d3}$ , кГц
1	850	50	50	520	580	650
2	540	70	230	110	130	230
3	380	–	50	130	–	–
4	220	130	200	130	200	–

По полученным осциллограммам с использованием имитатора с различными видами дефектов можно сделать вывод о том, что мощность зарегистрированных сигналов убывает с увеличением номера дефекта (уменьшение параметра  $A_m$ ), различными являются так же параметры  $T_n$ ,  $T_z$ ,  $F_{d1}$ ,  $F_{d2}$ ,  $F_{d3}$ , таким образом, можно проводить качественный анализ и распознавать дефекты по приведенным параметрам зарегистрированных акустических сигналов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведена информация по разработке и экспериментальным исследованиям имитатора с различным набором дефектов изоляции силовых трансформаторов. Приведены зарегистрированные сигналы акустического контроля для различных дефектов изоляции, представлены их количественные параметры.

## ВЫВОДЫ

Использование имитатора с различным набором дефектов позволит сопоставлять сигналы, измеренные на силовом оборудовании, с сигналами, полученными с использованием имитатора, это позволит определять не только наличие, но и виды дефектов в силовом оборудовании. Предложенные технические средства и приведенные параметры повысят достоверность диагностирования силовых трансформаторов в системе электроснабжения железнодорожного транспорта, принять своевременные меры по техническому обслуживанию или ремонту дорогостоящего оборудования.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00477, <https://rscf.ru/project/23-29-00477/>.

### 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. Черемисин В.Т., Кузнецов А.А., Волчанина М.А., Горлов А.В. Измерение параметров акустических сигналов имитатора дефектов силовых трансформаторов. // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. №4. С. 161 – 171. [Cheremisin VT, Kuznetsov AA, Volchanina MA, Gorlov AV. Izmerenie parametrov akusticheskikh signalov imitatora defektov silovykh transformatorov. *Transportnye sistemy i tehnologii*, 2020; Т. 6. №4: 161 – 171. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.02.2023. Доступно по: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_44680001\\_26388528.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44680001_26388528.pdf)

2. Вдовико В.П. Характеристики частичных разрядов и их применение в оценке качества электрической изоляции высоковольтного оборудования // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2005. – № 5. – С. 23–26. [Vdoviko VP. Kharakteristiki chastichnykh razryadov i ikh primeneniye v otsenke kachestva elektricheskoi izolyatsii vysokovoltnogo oborudovaniya. *Elektro*.

*Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost*, 2005;5:23-26. (In Russ.)). Ссылка активна на: 15.02.2023. Доступно по: <https://readera.org/read/142173958>

3. Markalous SM, Tenbohlen S, Feser K. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2008;15:1576-1583 [Internet]. [cited 2023 Feb 15]. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4712660>

4. Поляков Д.А., Шамганов Э.Б., Никитин К.И., Терещенко Н.А. Анализ эффективности регистрации частичных разрядов с использованием индуктивных и емкостных датчиков // Промышленная энергетика. – 2019. – № 12. – С. 30 – 35. [Polyakov DA, Shamganov EB, Nikitin KI, Tereshchenko NA. Analiz effektivnosti registratsii chastichnykh razriadov s ispolzovaniem induktivnykh i emkostnykh datchikov. *Promyshlennaiia energetika*, 2019; 12:30-35. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.02.2023. Доступно по: <http://www.promen.energy-journals.ru/index.php/PROMEN/article/view/1321>

5. Давиденко И.В., Овчинников К.В. Идентификация дефектов трансформаторов по анализу газов, растворенных в масле // Электротехника. – 2019. – № 4. – С. 48–54. [Davidenko IV, Ovchinnikov KV. Identifikatsiia defektov transformatorov po analizu gazov, rastvorenykh v masle. *Elektrotehnika*, 2019;4:48-54. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.02.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37246280>

6. Максудов Д.В., Федосов Е.М. Методы селекции сигналов частичных разрядов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2009. – № 2 (12). – С. 138–143. [Maksudov DV, Fedosov EM. Metody selektsii signalov chastichnykh razriadov. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009; 2(12):138-143. (In Russ.)]. Доступно по: <http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/1241/1078> Ссылка активна на: 15.02.2023.

7. Taha IBM, Dessouky SS, Ghaly RNR, Ghoneim SSM. Enhanced partial discharge location determination for transformer insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements. *Alexandria Engineering Journal*; 2020, 12 p. [Internet]. [cited 2023 Feb 15]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016820304282>

8. Bartnikas R. Partial discharges their mechanism, detection and measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2002;9:763-808 [Internet]. [cited 2023 Feb 15]. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1038663>

9. Lopez-Roldan J, Tang T, Gaskin M. Optimisation of a sensor for onsite detection of partial discharges in power transformers by the UHF method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*; 2008;15:1634-1639 [Internet]. [cited 2023 Feb 15]. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4712667>

10. Strachan SM, Rudd S, McArthur SDJ, et al. Knowledge-based diagnosis of partial discharges in power transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2008;15:259-268. [Internet]. [cited 2023 Feb 15]. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/3341015\\_Knowledge-based\\_diagnosis\\_of\\_partial\\_discharges\\_in\\_power\\_transformers](https://www.researchgate.net/publication/3341015_Knowledge-based_diagnosis_of_partial_discharges_in_power_transformers)

11. Патент РФ на изобретение № 2779269/ 05.09.2022. Бюл. № 25. Волчанина М. А., Горлов А. В., Еркебаев А. Ж., Кузнецов А. А. Устройство для мониторинга силовых трансформаторов. [Pat. RUS № 2779269/ 05.09.2022. Вул. № 25. Volchanina MA., Gorlov AV., Erkebaev AZh., Kuznetsov AA. Ustrojstvo dlja monitoringa silovykh transformatorov. (In Russ.)]. Режим доступа: <https://new.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/779/269/%D0%98%D0%97-02779269-00001/document.pdf> Дата обращения: 15.02.2023.

12. Патент РФ на изобретение № 2370784/ 20.10.2009, Бюл. № 29. Аксенов Ю. П., Прошлецов А. П. Способ определения места локализации и вида дефектов в активной части электрической машины, находящейся в рабочем режиме. [Pat. RUS № 2370784/ 20.10.2009. Byul. № 29. Aksenov JuP., Proshlecov AP. Sposob opredelenija mesta lokalizacii i vida defektov v aktivnoj chasti jelektricheskoj mashiny, nahodjashhejsja v rabochem rezhime. (In Russ.)]. Дата обращения: 15.02.2023. Режим доступа: <https://new.fips.ru/Archive/PAT/2009FULL/2009.10.20/DOC/RUNWC1/000/000/002/370/784/DOCUMENT.PDF>

13. Патент РФ на изобретение № 2615790/ 11.04.2017, Бюл. № 11/. Храмшин В.Р., Карандаев А. С., Храмшин Р. Р., Евдокимов С. А., Сарлыбаев А. А., Николаев А. А. Устройство для мониторинга силовых трансформаторов. [Pat. RUS № 2615790/ 11.04.2017. Byul. № 11. Hramshin VR., Karandaev AS., Hramshin RR., Evdokimov SA., Sarlybaev AA., Nikolaev AA. Ustrojstvo dlja monitoringa silovyh transformatorov (In Russ.)]. Дата обращения: 15.02.2023. Режим доступа: <https://www.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/615/790/%D0%98%D0%97-02615790-00001/document.pdf>

14. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. Екатеринбург: УрГУПС, 2011. – 370 с. [Rusov VA. *Izmerenie chastichnyh razrjadov v izoljacii vysokovol'tnogo oborudovanija*. Ekaterinburg: UrGUPS; 2011. 370 p. (In Russ.)].

15. Русов В.А. Диагностический мониторинг высоковольтных силовых трансформаторов. – Пермь: «Компромисс», 2012. – 160 с. [Rusov VA. *Diagnosticheskiy monitoring vysokovol'tnyh silovyh transformatorov*. Perm': «Kompromiss»; 2012. 160 p. (In Russ.)].

16. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Ивлиев В.В., и др. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций. – Новосибирск: Наука, 2011. – 272 с. [Ser'eznov AN., Stepanova LN., Ivliev VV., et al. *Akustiko-jemissionnyj kontrol' zheleznodorozhnyh konstrukcij*. Novosibirsk: Nauka; 2011. 272 p. (In Russ.)].

#### **Сведения об авторах:**

**Горлов Антон Вячеславович**, аспирант;  
eLibrary SPIN: 8845-5070; ORCID: 0000-0002-8413-6612;  
E-mail: anton.gorlov@mail.ru

**Волчанина Мария Андреевна**, инженер;  
eLibrary SPIN: 2130-4637; ORCID: 0000-0002-1815-4679;  
E-mail: kuznetcova994@gmail.com

**Пономарев Антон Витальевич**, к. т. н., доцент;  
eLibrary SPIN: 8927-5050; ORCID: 0000-0003-1468-5402;  
E-mail: antonyswork@gmail.com

**Кузнецов Андрей Альбертович**, д.т.н., профессор;  
eLibrary SPIN: 5259-0531; ORCID: 0000-0002-1815-4679;  
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

#### **Information about the authors:**

**Anton V. Gorlov**, PhD student;  
eLibrary SPIN: 8845-5070; ORCID: 0000-0002-8413-6612  
E-mail: anton.gorlov@mail.ru

**Maria A. Volchanina**, engineer;  
eLibrary SPIN: 2130-4637; ORCID: 0000-0002-1815-4679;  
E-mail: kuznetcova994@gmail.com

**Anton V. Ponomarev**, PhD, docent;  
eLibrary SPIN: 8927-5050; ORCID: 0000-0003-1468-5402  
E-mail: antonyswork@gmail.com

**Andrey A. Kuznetsov**, Doctor of Technical Science, professor;  
eLibrary SPIN: 5259-0531; ORCID: 0000-0002-1815-4679;  
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

**Цитировать:**

Горлов А.В., Волчанина М.А., Пономарев А.В., Кузнецов А.А. Исследование высоковольтных разрядов в масле на имитаторе с различным набором дефектов // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 1. – С. 83–94. doi: 10.17816/transsyst20239183-94

**To cite this article:**

Gorlov AV, Volchanina MA, Ponomarev AV, Kuznetsov AA. Investigation of high-voltage discharge in oil on a simulator with a different set of defects. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):83-94. doi: 10.17816/transsyst20239183-94

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

УДК [UDC] 629.1.06

DOI 10.17816/transsyst20239195-107

© А.А. Лисов, А.З. Кулганатов, С.А. Панишев

Южно-Уральский государственный университет

(Челябинск, Россия)

## АКУСТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ АВАРИЙНЫХ СЛУЖБ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

**Обоснование:** Сирена – это особый сигнал, подаваемый транспортными средствами службы экстренной помощи, такими как: пожарные машины, полицейские машины и машины скорой помощи для предупреждения водителей или пешеходов на дороге. Однако водители иногда могут не услышать звуки сирены из-за звукоизоляции современного автомобиля, шума городского трафика или причине собственной невнимательности. Эта проблема может привести к задержке в предоставлении помощи экстренных служб или даже к дорожно-транспортным происшествиям.

**Цель:** разработка акустического метода обнаружения присутствия автомобилей экстренных служб на дороге посредством применения сверточных нейронных сетей.

**Материалы и методы:** Алгоритм работы основан на преобразовании звука из внешней среды в его спектрограмму, для анализа методом машинного обучения – сверточными нейронными сетями. В качестве датасета звуков сирены и городского трафика использовался открытый набор данных (Emergency Vehicle Siren Sounds) из источников, доступных на интернет-сайтах, таких как Google и Youtube, сохраненных в аудиоформате “.wav”. Код разрабатывался на платформе Google.Colab при помощи облачного хранилища.

**Результаты:** Проведенные эксперименты показали, что предлагаемый метод и архитектура нейросети позволяют достичь средней эффективности определения типа звука с точностью 93,3 % и скоростью  $0,0004 \pm 5$  % секунды.

**Заключение:** Использование разработанной технологии распознавания сигналов экстренных служб в условиях городского трафика позволит повысить безопасность дорожного движения и увеличить шансы на предотвращение опасной ситуации. Также данная система может являться дополнительным помощником для слабослышащих людей во время вождения и повседневной жизни для своевременного оповещения о наличии поблизости экстренных служб.

**Ключевые слова:** машинное обучение, сверточные нейронные сети, распознавание сигналов аварийных служб.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Mathematical modeling, numerical methods and software packages

© А.А. Lisov, А.З. Kulganatov, S.A. Panishev

South Ural State University

(Chelyabinsk, Russia)

## USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR ACOUSTIC-BASED EMERGENCY VEHICLE DETECTION

**Background:** A siren is a special signal given by emergency vehicles such as fire trucks, police cars and ambulances to warn drivers or pedestrians on the road. However, drivers sometimes may not hear the siren due to the sound insulation of a modern car, the noise of city traffic, or their own inattention. This problem can lead to a delay in the provision of emergency services or even to traffic accidents.

**Aim:** develop an acoustic method for detecting the presence of emergency vehicles on the road through the use of convolutional neural networks.

**Materials and Methods:** The algorithm of work is based on the conversion of sound from the external environment into its spectrogram, for analysis by a convolutional neural network. An open dataset (“Emergency Vehicle Siren Sounds”) from sources available on Internet sites such as Google and Youtube, saved in the “.wav” audio format, was used as a dataset for siren sounds and city traffic. The code was developed on the Google.Colab platform using cloud storage.

**Results:** The conducted experiments showed that the proposed method and model of the neural network make it possible to achieve an average efficiency of determining the type of sound with an accuracy of 93.3 % and a speed recognition of  $0.0004 \pm 5$  % of a second.

**Conclusion:** The use of the developed technology for recognizing siren sounds in city noise will improve traffic safety and increase the chances of preventing a dangerous situation. Also, this system can be an additional assistant for hearing-impaired people while driving and everyday life for timely notification of the presence of emergency services nearby.

**Key words:** machine learning, convolutional neural networks, emergency vehicle signal recognition.

### ВВЕДЕНИЕ

Автомобили экстренной помощи играют важную роль в ситуации, угрожающей жизни, своевременное реагирование является важным аспектом данной работы. Городские пробки уносят более 20 % жизней пациентов в машине скорой помощи, а при очень тяжелом состоянии пациента процент летального исхода увеличивается [1]. В данной ситуации многие водители могут не пропустить машину скорой помощи из-за шума городского трафика, невнимательности, громкой музыки в машине или внешней звукоизоляции автомобиля. Для решения данной проблемы мы предлагаем внедрить интеллектуальную систему распознавания сигналов экстренных служб при помощи методов машинного обучения, в частности сверточных нейронных сетей.

Чтобы построить модель для распознавания звуков экстренных служб, первым делом нужно решить, в каком виде будут представлены и использованы данные. Можно строить модели, используя необработанную форму звуковой волны [2, 3], либо использовать двумерное представление звука, например в виде спектрограмм [4–6]. Спектрограммы становятся все более популярными в последнее время, потому что они хорошо работают со сверточными нейронными сетями (CNN) [4, 7]. Хотя модели CNN были

созданы для анализа естественных изображений, двумерные спектрограммы также могут быть использованы для обучения. Спектрограммы звуков содержат различные, но повторяющиеся паттерны. Поэтому в данной работе и было принято решение преобразования звука в спектрограмму, которая будет анализироваться специально обученной сверточной нейронной сетью.

Для решения данной задачи некоторые авторы создали ядра свертки (kernels), которые перемещаются только в одном направлении для сбора временных данных [8]. Другие предлагали рекуррентные нейронные сети RNN [9–13] или их комбинацию с CNN [6, 14, 15] для улучшения последовательного понимания данных. В 2014 году исследование [16] показало, что мы можем рассматривать эти спектрограммы как изображения и использовать стандартную архитектуру CNN, такую как AlexNet [17], предварительно обученную на ImageNet [18] для задачи классификации звука.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе проводились исследования в области машинного обучения для решения задачи обнаружения транспортных средств аварийных служб в условиях городского трафика. Основой разработанной программы для решения поставленной задачи является сверточная нейронная сеть, которая работает с открытым датасетом “Emergency Vehicle Siren Sounds”, который можно найти на “Kaggle” [19]. Этот набор данных был полностью создан вручную путем извлечения звука из источников, доступных на интернет-сайтах, таких как Google и Youtube, и сохранен в аудиоформате “.wav”. Датасет содержит звуки сирен автомобилей скорой помощи, шума городского трафика и пожарных машин. Каждая категория содержит 200 звуковых файлов и 200 изображений спектрограмм (которые не будут использованы в данной работе) для каждого звукового файла. Также следует отметить, что этот набор данных был специально создан для проекта машинного обучения, этот набор данных не связан с какой-либо организацией и не подлежит внешнему лицензированию, скачивание бесплатное, изменение и распространение этого набора данных полностью свободное. Исходная выборка изображений была разделена на 2 класса “test” и “train”, разделение выборки произведено в соотношении 1:10.

Код был разработан на платформе “Google.Collab”, на языке программирования “python”, основной библиотекой для машинного обучения является “TensorFlow” и в особенности ее модуль “Keras”. Код программы можно найти на GitHub одного из авторов по имени пользователя “AnLiMan” по названию репозитория “CNN-for-audio-recognition” [20]. Код является полностью доступным к редактированию и

коммерческому использованию и свободному распространению. Модель сверточной нейросети – последовательная (Sequential), содержащая в себе несколько слоев свертки для обработки изображений, визуализация ее архитектуры представлена на Рис. 1.

В работе использовались следующие методы: эксперимент и математическое моделирование. Основными методами процесса обучения нейронной сети, использованными в данной работе, являются алгоритм обратного распространения ошибки и использование матриц свертки для обнаружения закономерностей на изображениях. Ошибка распознавания рассчитывалась с использованием метода расчета стандартного отклонения.

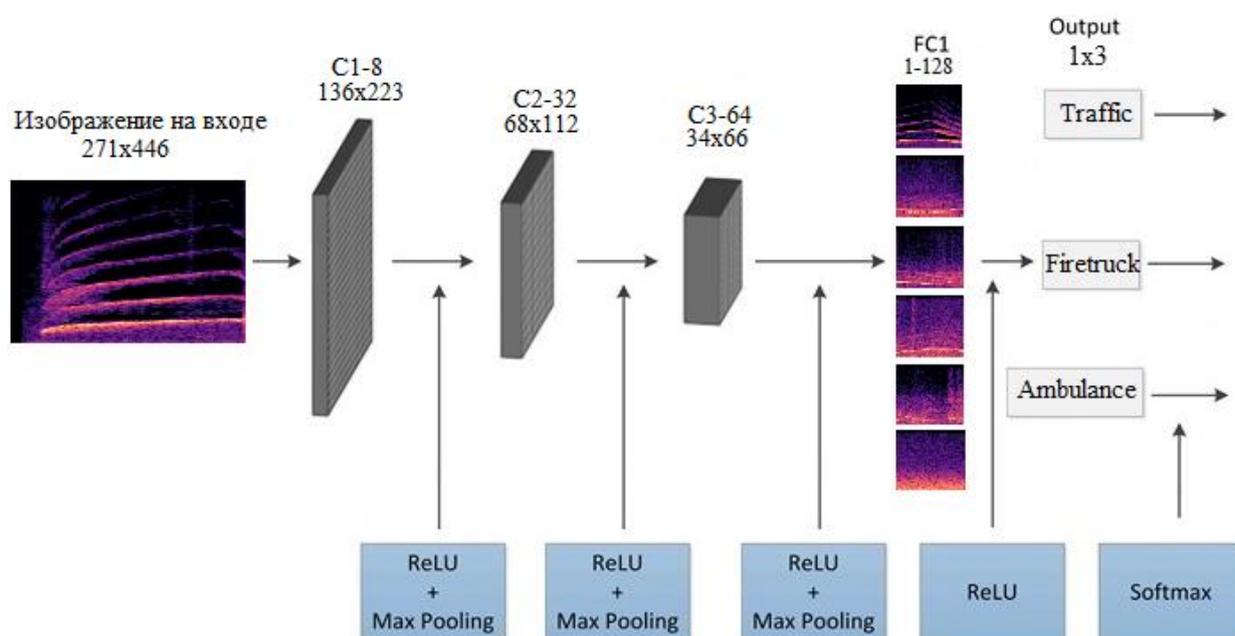


Рис. 1. Архитектура CNN для распознавания sireны аварийных служб

Источник: составлено авторами

Для преобразования звуков в спектрограммы использовалась библиотека “Librosa” – это библиотека Python для анализа музыки и аудио. Она предоставляет функции, необходимые для создания систем поиска информации о музыке и аудио. В соответствии с разработанной методикой и идеей проекта – звук с микрофона передается в записывающее устройство, которое делит его на фрагменты по 3 секунды и отправляет на обработку сверточной нейросети. Пример, генерируемых спектрограмм скорой машины (ambulance) показана на Рис. 2, пожарной машины (firetruck) на Рис. 3 и городского шума (traffic) на Рис. 4. Как видно из иллюстраций спектрограммы звуков sireны имеют четкие паттерны и определенный частотный диапазон, в то время как городской трафик просто равномерно занимает всю доступную слышимую область. Однако

для работы сети требуется убрать дополнительную информацию о сэмпле, которая также генерируется библиотекой “Librosa” до уровня, показанного на Рис. 5.

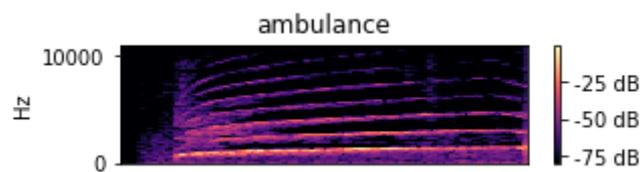


Рис. 2. Спектрограмма скорой машины (ambulance)

Источник: составлено авторами

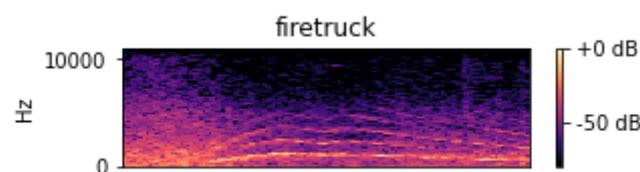


Рис. 3. Спектрограмма пожарной машины (firetruck)

Источник: составлено авторами

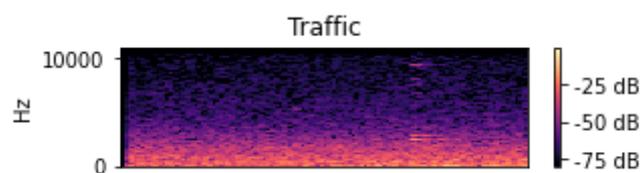


Рис. 4. Спектрограмма городского шума (traffic)

Источник: составлено авторами

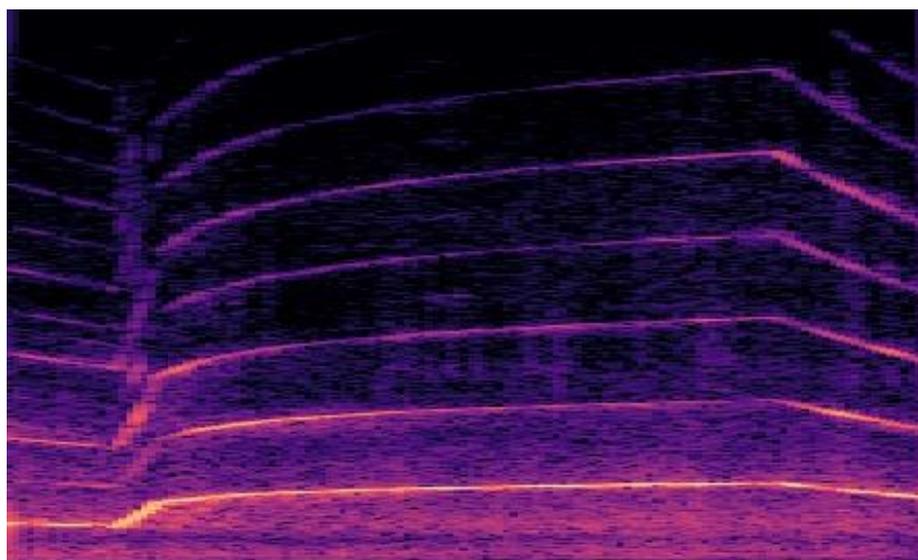


Рис. 5. «Очищенная» спектрограмма звуковой дорожки

Источник: составлено авторами

### Создание модели CNN.

Сверточная нейронная сеть (ConvNet / CNN) – это алгоритм глубокого обучения, который может принимать входное изображение, назначать важность различным аспектам или объектам на изображении и иметь возможность отличать одно от другого. CNN может успешно фиксировать пространственные и временные зависимости в изображении с помощью применения соответствующих фильтров.

При разработке сверточной нейросети использовалась библиотека от Google – “Tensorflow” и в особенности ее модуль “Keras”, модель сверточной нейросети – последовательная (Sequential), содержащая в себе несколько слоев свертки для обработки изображений, код для создания архитектуры модели представлен ниже, визуализация архитектуры представлена на Рис. 1.

```
model = tf.keras.models.Sequential([
    tf.keras.layers.Conv2D(8, (2,2), activation='relu', input_shape=(271, 446, 3)),
    tf.keras.layers.MaxPooling2D(2, 2),
    tf.keras.layers.Conv2D(32, (2,2), activation='relu'),
    tf.keras.layers.MaxPooling2D(2,2),
    tf.keras.layers.Conv2D(64, (2,2), activation='relu'),
    tf.keras.layers.MaxPooling2D(2,2),
    tf.keras.layers.Flatten(),
    tf.keras.layers.Dense(128, activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dropout(0.2),
    tf.keras.layers.Dense(3, activation='softmax')
])
```

### Алгоритм работы.

Алгоритм обучения сверточной нейросети показан на Рис. 6. Процесс обучения начинается с импорта библиотек машинного обучения, работы со звуком, массивами, архивами, изображениями и облачными хранилищами. После импорта звуков они с помощью библиотеки “Librosa” преобразуются в спектрограммы, показанные ранее на Рис. 2–4 до уровня изображений, показанных на Рис. 5. Далее идет определение архитектуры сети, которая была подробно описана ранее. Основной процесс обучения занимает порядка 12 минут. В случае, если точность распознавания превысит 93 %, либо если закончится количество эпох обучения, то процесс обучения завершится. После модель и ее веса сохраняются на облачном хранилище, чтобы не повторять процесс обучения снова в будущем, а просто загрузить готовую модель для работы.



Рис. 6. Алгоритм обучения сверточной нейронной сети

Источник: составлено авторами

Резюме сверточной нейронной сети приведено в Табл. 1. Из данной таблицы можно увидеть, что конечная архитектура нейросети содержит примерно 14,6 млн параметров, что является, довольно, небольшим значением.

Таблица. Параметры модели нейросети

Тип слоя	Размер на выходе	Число параметров
conv2d (Conv2D)	(None, 270, 445, 8)	104
max_pooling2d (MaxPooling2D)	(None, 135, 222, 8)	0
conv2d_1 (Conv2D)	(None, 134, 221, 32)	1056
max_pooling2d_1 (MaxPooling 2D)	(None, 67, 110, 32)	0
conv2d_2 (Conv2D)	(None, 66, 109, 64)	8256
max_pooling2d_2 (MaxPooling 2D)	(None, 33, 54, 64)	0
flatten (Flatten)	(None, 114048)	0
dense (Dense)	(None, 128)	14 598 272
dropout (Dropout)	(None, 128)	0
dense_1 (Dense)	(None, 3)	387
Всего параметров		14 608 075

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как уже было сказано ранее, примерное время обучения составило 12 мин., график данного процесса показан на Рис. 7. Для последней эпохи обучения были получены следующие результаты: loss: 0,1844 – accuracy: 0,9212 – val\_loss: 0,2081 – val\_accuracy: 0,9333. Здесь loss – «потери», разница между полученным значением предсказания и реальным, accuracy – точность распознавания для текущей эпохи. Главные показатели это “val\_loss” и “val\_accuracy”, отображающие итоговые результаты обучения сети.

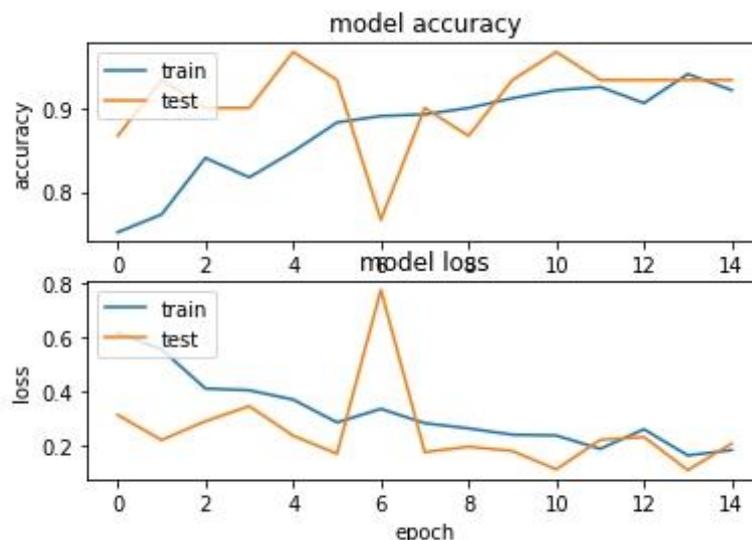


Рис. 7. График процесса обучения

Источник: составлено авторами

Далее была проведена проверка точности распознавания нейросети. Ниже на Рис. 8 приведен результат распознавания 16-ти случайных изображений из тестовой выборки. Зеленый цвет означает, что изображение было распознано правильно, за скобками указано предсказанное значение, а в скобках реальное. Как видно из Рис. 8, точность в 93,3 % позволяет достичь достаточно высоких результатов. Алгоритм работы можно несколько изменить, если в качестве обучающего набора использовать аудиофайлы короче 3-х секунд и усреднять итоговый прогноз. Однако в рамках данного исследования такой эксперимент не проводился.

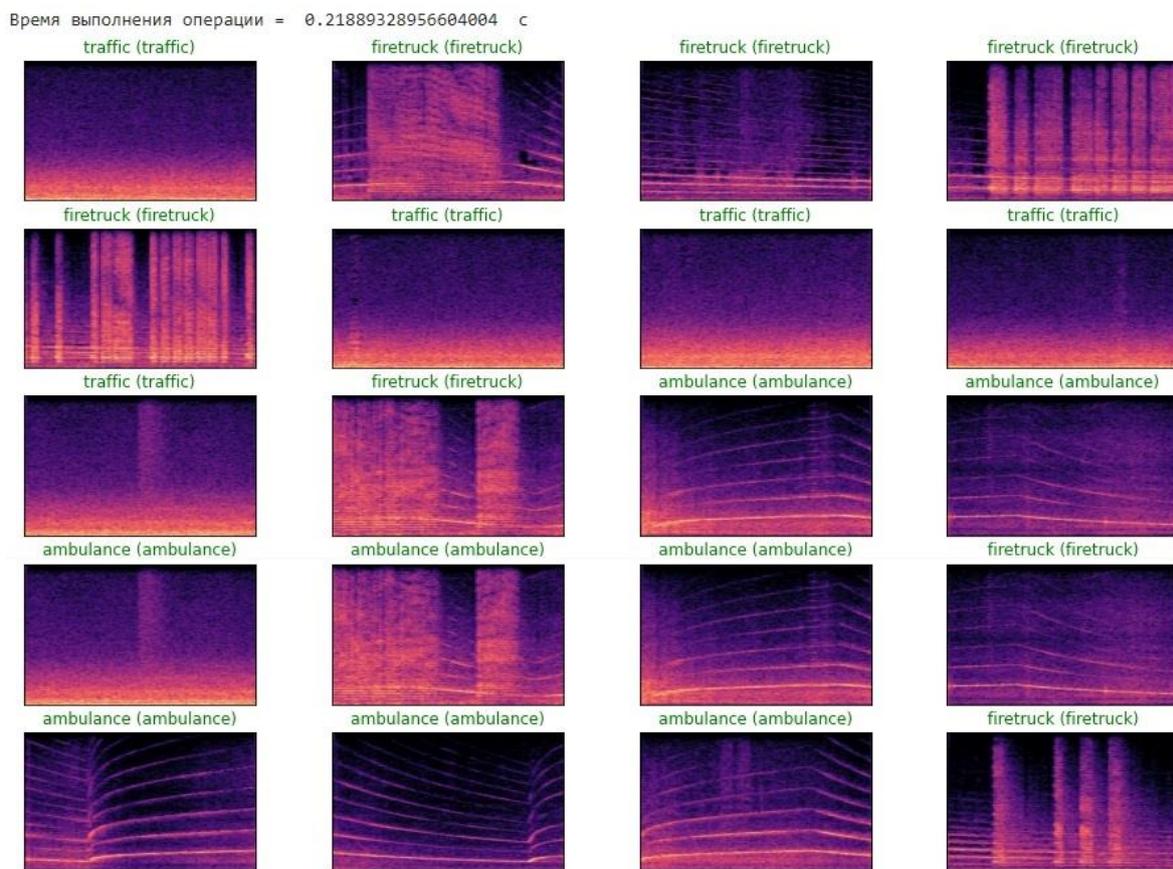


Рис. 8. Проверка точности распознавания на 16-ти случайных спектрограммах

Источник: составлено авторами

Также был проведен тест скорости распознавания и вывода одного изображения (Рис. 9) результат составил примерно 0,0205 секунды. Однако алгоритм работы можно усовершенствовать, если убрать вывод изображения, в котором нет необходимости человеку, в этом случае скорость распознавания составит –  $0,0004 \pm 5\%$  секунды.



Рис. 9. Проверка отдельного изображения из тестовой выборки

Источник: составлено авторами

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для увеличения скорости работы нейронной сети мы предлагаем убрать компонент визуализации результата предсказания, что позволит добиться скорости распознавания –  $0,0004 \pm 5\%$  секунд для всех изображений из тестовой выборки.

Следует отметить важное ограничение данной работы – достаточно сложно добиться высокой точности распознавания без использования дополнительных методов фильтрации и обработки изображений. Поэтому для повышения производительности сети необходимо применять алгоритмы предварительной обработки необработанных изображений, например, фильтром Гаусса или аналогичным. Также следует провести постобработку результатов прогнозирования, путем усреднения или перепроверки. Для улучшения качества предсказания также можно повысить порог срабатывания (threshold) нейрона, но в этом случае потребуется увеличить размер датасета.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование разработанной технологии распознавания сигналов экстренных служб в условиях городского трафика позволит повысить безопасность дорожного движения и увеличить шансы на предотвращение опасной ситуации.

Также данная система может являться дополнительным помощником для слабослышащих людей во время вождения и повседневной жизни для своевременного оповещения о наличии поблизости экстренных служб.

Разработанная модель сверточной нейронной сети может быть легко интегрирована в интеллектуальную систему помощи водителю или для системы автопилота беспилотного автомобиля.

Результаты исследования показали эффективность работы сети на уровне 93,3 % и скорость распознавания примерно равной 0,4 м/с при использовании интерпретируемого языка python. Данное время можно

уменьшить, если экспортировать модель на компилируемый язык программирования, например, C#.

Датасет звуков сирены, который использовался для эксперимента может быть успешно заменен соответствующими звуками страны, в которой планируется использование данной системы без критического изменения кода разработанной программы.

## РЕКОМЕНДАЦИЯ К ПУБЛИКАЦИИ

Старший научный сотрудник Южно-Уральского Государственного университета, доктор технических наук, профессор Александр Григорьевич Возмилов рекомендует данную статью к публикации.

### 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. Kanzaria HK, Probst MA, Hsia RY. Emergency department death rates dropped by nearly 50 percent, 1997–2011. *Health Affairs*. 2016 Jul 1;35(7):1303-8. doi:10.1377/hlthaff.2015.1394
2. Lee J, Park J, Kim KL, Nam J. Sample-level deep convolutional neural networks for music auto-tagging using raw waveforms. *arXiv preprint arXiv:1703.01789*. 2017 Mar 6. doi: 10.48550/arXiv.1703.01789
3. Zhu Z, Engel JH, Hannun A. Learning multiscale features directly from waveforms. *arXiv preprint arXiv:1603.09509*. 2016 Mar 31. doi: 10.48550/arXiv.1603.09509
4. Choi K, Fazekas G, Sandler M. Automatic tagging using deep convolutional neural networks. *arXiv preprint arXiv:1606.00298*. 2016 Jun 1. doi: 10.48550/arXiv.1606.00298
5. Nasrullah Z, Zhao Y. Music artist classification with convolutional recurrent neural networks. *In 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) 2019 Jul 14 (pp. 1-8)*. IEEE. doi: 10.1109/IJCNN.2019.8851988
6. Wang Z, Muknahallipatna S, Fan M, et al. Music classification using an improved crnn with multi-directional spatial dependencies in both time and frequency dimensions. *In 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) 2019 Jul 14 (pp. 1-8)*. IEEE. doi: 10.1109/IJCNN.2019.8852128
7. Dieleman S, Brakel P, Schrauwen B. Audio-based music classification with a pretrained convolutional network. *In 12th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR-2011) 2011 (pp. 669-674)*. University of Miami.
8. Chen MT, Li BJ, Chi TS. CNN based two-stage multi-resolution end-to-end model for singing melody extraction. *In ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) 2019 May 12 (pp. 1005-1009)*. IEEE. doi: 10.1109/ICASSP.2019.8683630
9. Phan H, Koch P, Katzberg F, et al. Audio scene classification with deep recurrent

- neural networks. *arXiv preprint arXiv:1703.04770*. 2017 Mar 14. doi: 10.48550/arXiv.1703.04770
10. Gimeno P, Viñals I, Ortega A, et al. Multiclass audio segmentation based on recurrent neural networks for broadcast domain data. *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*. 2020 Dec;2020:1-9.
  11. Dai J, Liang S, Xue W, et al. Long short-term memory recurrent neural network based segment features for music genre classification. *In 2016 10th International Symposium on Chinese Spoken Language Processing (ISCSLP) 2016 Oct 17 (pp. 1-5)*. IEEE. doi: 10.1109/ISCSLP.2016.7918369
  12. Zhang Z, Xu S, Zhang S, et al. Attention based convolutional recurrent neural network for environmental sound classification. *Neurocomputing*. 2021 Sep 17;453:896-903. doi: 10.1016/j.neucom.2020.08.069
  13. Wang H, Zou Y, Chong D, Wang W. Environmental sound classification with parallel temporal-spectral attention. *arXiv preprint arXiv:1912.06808*. 2019 Dec 14. doi: 10.48550/arXiv.1912.06808
  14. Sang J, Park S, Lee J. Convolutional recurrent neural networks for urban sound classification using raw waveforms. *In 2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO) 2018 Sep 3 (pp. 2444-2448)*. IEEE. doi: 10.23919/EUSIPCO.2018.8553247
  15. Choi K, Fazekas G, Sandler M, Cho K. Convolutional recurrent neural networks for music classification. *In 2017 IEEE International conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP) 2017 Mar 5 (pp. 2392-2396)*. IEEE. doi: 10.1109/ICASSP.2017.7952585
  16. Gwardys G, Grzywczak D. Deep image features in music information retrieval. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2014;60:321-6. doi: 10.2478/eletel-2014-0042
  17. Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*. 2017 May 24;60(6):84-90. doi: 10.1145/3065386
  18. Deng J, Dong W, Socher R, et al. Imagenet: A large-scale hierarchical image database. *In 2009 IEEE conference on computer vision and pattern recognition 2009 Jun 20 (pp. 248-255)*. IEEE. doi: 10.1109/CVPR.2009.5206848
  19. Emergency Vehicle Siren Sounds [Internet]. Kaggle [cited 2023 February 23]. Available from: <https://www.kaggle.com/vishnu0399/emergency-vehicle-siren-sounds>
  20. CNN for audio recognition. GitHub [cited 2023 February 23]. Available from: <https://github.com/AnLiMan/CNN-for-audio-recognition>

**Сведения об авторах:**

**Лисов Андрей Анатольевич**, аспирант;

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

E-mail: lisov.andrey2013@yandex.ru

**Кулганатов Аскар Зайдакбаевич**, аспирант;

eLibrary SPIN: 7607-9723; ORCID: 0000-0002-7576-7949;

E-mail: kulganatov97@gmail.com

**Панишев Сергей Алексеевич**, аспирант;

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

E-mail: panishev.serega@mail.ru

**Information about the authors:**

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

**Askar Z. Kulganatov**, postgraduate student;  
eLibrary SPIN 7607-9723; ORCID: 0000-0002-7576-7949;  
E-mail: kulganatov97@gmail.com

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

**Цитировать:**

Лисов А.А., Кулганатов А.З., Панишев С.А. Акустическое обнаружение транспортных средств аварийных служб с использованием сверточных нейронных сетей // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 1. – С. 95–107. doi: 10.17816/transsyst20239195-107

**To cite this article:**

Lisov AA, Kulganatov AZ, Panishev SA. Using convolutional neural networks for acoustic-based emergency vehicle detection. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):95-107. doi: 10.17816/transsyst20239195-107

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

УДК [UDC] 656.2 + 06

DOI 10.17816/transsyst202391108-121

© В.А. Богачев<sup>1</sup>, А.С. Кравец<sup>1</sup>, Т.В. Богачев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения

<sup>2</sup>Ростовский государственный экономический университет

(Ростов-на-Дону, Россия)

## МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ЛОГИСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК С ВРЕМЕННЫМИ И СТОИМОСТНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

**Цель:** Разработка нового подхода к оптимизации процесса распределения грузопотоков на транспортном полигоне. Построение математической модели процесса грузоперевозок, учитывающей в равной степени интересы различных участников перевозочного процесса.

**Материалы и методы:** Строится математическая модель процесса грузоперевозок, которая опирается на инфраструктурные показатели рассматриваемой части железнодорожного полигона и представляет собой многокритериальную оптимизационную задачу целочисленного программирования. Алгоритм решения задачи является общим для наземного транспорта и реализован в среде системы компьютерной алгебры. В качестве проекта, представляющего собой пример приложения разработанного транспортно-логистического метода, рассматривается часть Северо-Кавказской железной дороги, примыкающая к основным грузовым портам Азово-Черноморского бассейна. Рассматриваемый железнодорожный полигон является транзитной составляющей, активно эксплуатируемой при российском экспорте, в частности, зерновых грузов.

**Результаты:** Изучаются вопросы организации железнодорожных грузоперевозок в мультимодальных транспортно-технологических системах на основе эгалитарного и утилитарного подходов в теории благосостояния. Указанные подходы рассматриваются в отношении участников перевозочного процесса (агентов) в рамках временных и стоимостных показателей этого процесса. Вычислительные процедуры нахождения оптимальных распределений грузопотоков доведены до конкретных результатов.

**Заключение:** Математический эксперимент, используемый как инструмент имитационного моделирования, позволяет разносторонне и целенаправленно манипулировать показателями перевозочного процесса и ограничениями, накладываемыми на планы перевозок. Полученные в результате оптимизации по Парето распределения грузопотоков в адрес припортовых станций выгрузки, анализируются с точки зрения их рациональности и полезности в отношении агентов.

**Ключевые слова:** железнодорожные грузоперевозки, мультимодальные транспортно-технологические системы, распределения экспортных грузопотоков, моделирование перевозочного процесса, оптимизация по Парето, зеленая логистика.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Ground transport and logistics facilities and complexes

© V.A. Bogachev<sup>1</sup>, A.S. Kravets<sup>1</sup>, T.V. Bogachev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rostov State Transport University

<sup>2</sup>Rostov State University of Economics

(Rostov-on-Don, Russia)

## MATHEMATICAL EXPERIMENT IN LOGISTICS RESEARCH OF MULTIMODAL FREIGHT TRANSPORTATION WITH TIME AND COST INDICATORS

**Aim:** Development of a new approach to optimizing the process of cargo flows distribution at the transport loop. Construction of a mathematical model of the freight transportation process, which equally takes into account the interests of various participants in the transportation process.

**Materials and Methods:** A mathematical model of the freight transportation process is built, which is based on the infrastructure indicators of the considered part of the railway loop and is a multicriteria optimization problem of integer programming. The algorithm for solving the problem is common for land transport and is implemented in the environment of a computer algebra system. As a project, which is an example of the application of the developed transport and logistics method, a part of the North-Caucasian railway, adjacent to the main cargo ports of the Azov-Black Sea basin, is considered. The considered railway loop is a transit component, actively exploited for Russian exports, in particular, grain cargoes.

**Results:** The issues of organizing rail freight transportation in multimodal transport and technological systems are researched on the basis of egalitarian and utilitarian approaches in welfare theory. These approaches are considered in relation to the participants in the transportation process (agents) within the framework of the time and cost indicators of this process. Computational procedures for finding optimal distributions of cargo flows have been brought to concrete results.

**Conclusion:** A mathematical experiment used as a simulation modeling tool allows versatile and purposeful manipulation of the indicators of the transportation process and the restrictions imposed on transportation plans. The cargo flows distributions to port unloading stations obtained as a result of Pareto optimization are analyzed from the point of view of their rationality and usefulness in relation to agents.

**Key words:** rail freight transportation, multimodal transport and technological systems, distribution of export cargo flows, modeling of the transportation process, Pareto optimization, green logistics.

## ВВЕДЕНИЕ

Вопросам исследования эффективности мультимодальных грузовых перевозок, включающих в себя перевалку в морских портах, посвящено большое количество исследований, проводившихся в последнее время. Глобализация транспортных процессов, сопровождаемая их цифровизацией, а также различия в целях и задачах участников перевозки

приводят к необходимости более глубокого и разностороннего их изучения.

В настоящей работе представлен подход в исследовании эффективности процесса грузовых перевозок, при котором практическая реализация разработанных алгоритмов выполняется в среде системы аналитических вычислений.

В качестве перевозимого груза рассматривается один из стратегически важных экспортируемых из России сырьевых товаров – зерновые. Характерные для зерновых грузов массовость и относительно низкая стоимость во многом способствуют при их транспортировке комплексному использованию железнодорожного и морского видов транспорта. Отметим, что разработанная в статье методика исследований является весьма общей и применима к перевозкам других видов грузов.

При выборе схем мультимодальных перевозок грузов, экспортируемых через морские порты, естественно учитывать факторы, объективно влияющие на активность функционирования этих портов. Среди таких факторов следует выделить, в первую очередь, их географическое положение (в том числе, относительно инфраструктуры железнодорожного транспорта) и техническую оснащенность. При этом возрастающий уровень конкуренции между железнодорожным и автомобильным видами транспорта является внешним фактором, который стимулирует нахождение оптимальных схем грузоперевозок в отношении железнодорожного транспорта, особенно при условии его участия в мультимодальных перевозках. Следует обратить еще внимание на распыленность станций погрузки зерна на юге России, разветвленность путей сообщения (в том числе, в направлении портов), а также присутствие на рынке большого количества транспортных компаний. Таким образом, для грузоотправителей является весьма актуальной задача, состоящая в том, чтобы в соответствии с интересующими их показателями перевозочного процесса среди возможных схем грузоперевозок иметь возможность выбирать те, которые оказываются рациональными с точки зрения организации всей транспортно-логистической цепочки.

Сложность структуры субъектов перевозочного процесса, а также разнообразие возможных элементов логистической цепочки предполагает всестороннее изучение возможных вариантов схем перевозки и выбор оптимального среди них. Вопросы необходимости цифровизации транспортных процессов представлены в [1–15]. Разница в интересах участников перевозок отмечается в [5]. Различия в их целях и задачах определяет сложности в выработке единой транспортной стратегии и делает необходимым более глубокое изучение транспортных технологий с целью поиска новых методов, которые позволят найти результат выгодный одновременно для всех участников. В [7] предлагается математическая модель распределения экспортных грузопотоков, построенная на основе

теории игр и теории графов. В результате проведенного моделирования оказывается возможным привлечение дополнительных объемов грузов за счет оптимизации стоимости перевозки на конкретном маршруте. В [9] представлена модель, основанная на прогнозе транспортных потоков с учетом инфраструктурных ограничений, что позволяет минимизировать затруднения в движении транспорта.

Проведенный выше анализ работ позволяет сделать вывод об актуальности исследований, имеющих целью нахождение рациональных схем мультимодальных перевозок грузов и выполняемых на основе синергетических подходов, при которых осуществляется синтез использованных ранее идей. Отметим, что любой из подходов наиболее рационально применять с помощью использования цифровых логистических технологий, позволяющих вырабатывать решения на основе заданных критериев.

## МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

**1. Математическая модель процесса грузоперевозок с временными показателями.** Рассматривается  $m$  станций погрузки и  $n$  станций выгрузки. Пусть  $a_i$  – число отправительских маршрутов с некоторым грузом, запланированных к вывозу с  $i$ -й станции погрузки ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), и  $x_{ij}$  – число отправительских маршрутов, которые могут быть отправлены с  $i$ -й станции погрузки в адрес  $j$ -й станции выгрузки ( $j = 1, 2, \dots, n$ ). Сначала в отношении множества  $D$  допустимых планов перевозок  $(x_{ij})$  будем предполагать лишь выполнение условия:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i (i = 1, 2, \dots, m). \quad (1)$$

Равенства (1) означают, что каждый маршрут, запланированный к вывозу с каждой из станций погрузки, должен быть отправлен в адрес какой-либо из станций выгрузки. В процессе разработки модели изначальная открытость транспортной задачи в отношении станций выгрузки будет дополняться рядом ограничений. Они будут накладываться на множество  $D$  с учетом специфики транспортно-логистической ситуации на рассматриваемой части полигона.

Следуя предложенному в [15] подходу в изучении процесса грузоперевозок, введем временные показатели, которые в своей совокупности позволяют учитывать уровень организации этого процесса, а также интересы зеленой логистики.

Начнем с набора показателей, выражаемых целевыми функциями вида:

$$\tau^{(j)} = \sum_{i=1}^m t_{ij} x_{ij} \quad (j = 1, \dots, n), \quad (2)$$

где  $t_{ij}$  – среднее статистическое время следования отправительского маршрута на участке между  $i$ -й станцией погрузки ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) и  $j$ -й станцией выгрузки ( $j = 1, 2, \dots, n$ ). Каждый из показателей  $\tau^{(j)}$  называется *суммарным временем* плана перевозок ( $x_{ij}$ ) в направлении  $j$ -й станции выгрузки.

Показателем  $\tau^{(j)}$  ( $j = 1, \dots, n$ ) выражается время нахождения на полигоне всех тех отправительских маршрутов из данного плана перевозок ( $x_{ij}$ ), которые оказываются направленными в адрес  $j$ -й станции выгрузки. Указанные показатели предоставляют возможность выделять станции выгрузки, принимая во внимание причины и последствия загруженности частей полигона, расположенных в соответствующих направлениях. Являясь объективными оценками степени загруженности, показатели  $\tau^{(j)}$  позволяют, в частности, контролировать и регулировать соблюдение принципов зеленой логистики на рассматриваемой части полигона. Сказанное весьма актуально для направлений в сторону Черноморского побережья, поскольку они традиционно относятся к курортным.

Следующий временной показатель характеризует изучаемую транспортно-логистическую конструкцию в целом и выражается целевой функцией вида:

$$T = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m t_{ij} x_{ij}. \quad (3)$$

Показатель  $T$  будем называть *суммарным временем* плана перевозок ( $x_{ij}$ ). Этим показателем выражается суммарное время нахождения на полигоне всех отправительских маршрутов, которые участвуют в реализации плана перевозок ( $x_{ij}$ ). В минимизации показателя  $T$  (возможно, в «скрытом» от других агентов виде) заинтересован, например, такой агент как владелец инфраструктуры.

В качестве агентов будем рассматривать также перевозчика, операторскую компанию (владельца подвижного состава), логистическую компанию и клиентов (грузоотправителей, грузовладельцев). Под рациональными схемами распределения грузопотоков будем понимать такие, что при их реализации оказывается учтенным ряд интересов рассматриваемых агентов.

**2. Исходные характеристики транспортного потока.** В качестве объекта приложения разработанных в статье оптимизационных алгоритмов рассматривается конкретный транспортно-логистический проект. Предполагается, что предназначенное для перевозки зерно находится на станциях погрузки Целина, Белоглинская и Изобильная. Станциями выгрузки являются припортовые станции: Азов, Таганрог и Ейск (относящиеся к малым портам), а также – Туапсе и Тамань (относящиеся к глубоководным портам).

Реализованные в среде системы компьютерной алгебры (Free Ware) вычислительные процедуры выполняются для численных данных, приведенных в Табл. 1 (временные характеристики транспортного потока найдены с учетом его маршрутной скорости).

Таблица 1. Характеристики исследуемых поездопотоков

Припортовые станции	Станции погрузки					
	Целина		Белоглинская		Изобильная	
	<i>t</i> , сут.	<i>c</i> , тыс.руб.	<i>t</i> , сут.	<i>c</i> , тыс.руб.	<i>t</i> , сут.	<i>c</i> , тыс.руб.
Азов	0,51	980,58	0,84	1183,5	1,13	1391,22
Таганрог	0,92	1064,34	0,99	1272,84	1,29	1448,88
Ейск	0,68	1222,92	0,78	1448,88	1,07	1623,84
Туапсе	1,43	1569,36	1,34	1332,72	1,25	1391,22
Тамань	1,47	1691,10	1,28	1448,88	1,38	1513,86

### 3. Оптимизационная задача без дополнительных ограничений.

Рассматривается оптимизационная задача транспортного типа, которая с точки зрения математической классификации является многокритериальной задачей целочисленного программирования. При составлении алгоритма ее решения мы опираемся на принципы эгалитарного и утилитарного подходов в теории благосостояния. Концепция эгалитаризма подразумевает реализацию принципа единогласия (в том или ином его виде). При этом естественно обратиться к понятию оптимального по Парето решения задачи. В результате для рассматриваемых агентов достигается определенный баланс интересов. Концепция утилитаризма подразумевает максимизацию суммы индивидуальных полезностей агентов. В проводимых исследованиях указанные принципы используются каждый в отдельности, а также в сочетании.

В отношении специфики ситуации на рассматриваемой части полигона СКЖД будем учитывать следующие обстоятельства. Во-первых, обратим внимание на весьма низкую пропускную способность железнодорожных подходов к станциям Азов, Таганрог и Ейск (напомним, эти станции относятся к малым портам). Ситуация усугубляется тем, что на указанных станциях отсутствуют склады достаточно большой емкости. Таким образом, использование соответствующей транспортной инфраструктуры жестко регламентировано по времени. Другим обстоятельством, которое имеет не транспортный характер и напрямую относится к области «зеленой» логистики, является то, что участки полигона, примыкающие к припортовым станциям Туапсе и Тамань, расположены в курортной зоне.

Предварительные исследования будем проводить в рамках трех временных показателей:

$$T_1 = \sum_{j=1}^3 \tau^{(j)}, \quad T_2 = \sum_{j=4}^5 \tau^{(j)} \quad \text{и} \quad T. \quad (4)$$

В силу выражений (2) и (3) эти показатели связаны между собой равенством  $T_1 + T_2 = T$ .

Сначала будем предполагать, что на каждой из трех станций погрузки находится по 5 отправительских маршрутов с зерном. Чтобы иметь представление об объемах вычислений, выполняемых в процессе решения рассматриваемых оптимизационных задач, сделаем замечание комбинаторного характера. Именно, множество  $D$  всех допустимых планов перевозок  $(x_{ij})$ , удовлетворяющих равенствам (1), в указанном случае состоит из  $(n^m)^2 = (5^3)^5 = 5^{15} = 30517578125$  планов. Соответственно в случае, когда на каждой из станций погрузки находится по 6 отправительских маршрутов, число всех допустимых планов перевозок равно  $5^{18} = 3814697265625$ .

Начнем с оптимизации процесса грузоперевозок с рассмотрением одного – «объединенного» показателя  $T$ . То есть с точки зрения теории благосостояния обратимся к утилитарному подходу. В Табл. 2 приведены 5 планов перевозок из 92 планов, полученных программой в процессе минимизации целевой функции  $T$ . Содержащийся в последней строке Табл. 2 оптимальный план перевозок показывает, насколько неравномерным оказывается распределение маршрутов по припортовым станциям выгрузки. На станцию Таганрог, а также на станции Туапсе и Тамань (напомним, что этими двумя станциями в рассматриваемом проекте представлены все глубоководные порты) не попадает ни одного маршрута.

Таблица 2. Распределение маршрутов по станциям и значения показателей

№	Планы транспортировки	Число отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					$T_1$	$T_2$	$T$
		<i>Азов</i>	<i>Таганрог</i>	<i>Ейск</i>	<i>Туапсе</i>	<i>Тамань</i>			
1	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,0,5	0	0	0	0	15	0,00	20,65	20,65
2	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,0,1,4	0	0	0	1	14	0,00	20,52	20,52
3	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,0,2,3	0	0	0	2	13	0,00	20,39	20,39
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
91	4,0,1,0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0	4	0	11	0	0	11,97	0,00	11,97
92	5,0,0,0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0	5	0	10	0	0	11,80	0,00	11,80

Перейдем к оптимизации процесса грузоперевозок с рассмотрением двух временных показателей  $T_1$  и  $T_2$ . С точки зрения теории благосостояния это будет соответствовать тому, что мы обратимся к

эгалитарному подходу. Указанными показателями выражаются интересы агентов, относящиеся соответственно к малым и глубоководным портам. Кроме того, поскольку показателем  $T_2$  выражается время нахождения на полигоне всех отправительских маршрутов (из данного плана перевозок  $(x_{ij})$ ), направленных в адрес станций Туапсе и Тамань, минимизация показателя  $T_2$  соответствует принципам «зеленой» логистики.

Каждому плану перевозок  $(x_{ij}) \in D$  поставим в соответствие вектор  $\{T_1, T_2\}$ , называемый вектором полезностей. Оптимальным назовем такой план перевозок  $(x_{ij}^*) \in D$  с вектором полезностей  $\{T_1^*, T_2^*\}$ , для которого не существует плана перевозок  $(x_{ij}) \in D$  такого, что координаты его вектора полезностей  $\{T_1, T_2\}$  удовлетворяют условию

$$(T_1 < T_1^* \wedge T_2 \leq T_2^*) \vee (T_1 \leq T_1^* \wedge T_2 < T_2^*). \quad (5)$$

В Табл. 3 приведены 5 планов перевозок из 11 планов, полученных в качестве «ступенек» в «оптимизационной лестнице», отражающей процесс улучшения допустимых планов согласно логической связке (5).

Таблица 3. Распределение маршрутов по станциям и значения показателей

№	Планы транспортировки	Число отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					$T_1$	$T_2$	$T$
		Азов	Таганрог	Ейск	Туапсе	Тамань			
1	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,0,5	0	0	0	0	15	0,00	20,65	20,65
2	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,0,1,4	0	0	0	1	14	0,00	20,52	20,52
3	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,0,2,3	0	0	0	2	13	0,00	20,39	20,39
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
10	0,0,0,4,1,0,0,0,0,5,0,0,0,5,0	0	0	0	9	6	0,00	19,84	19,84
11	0,0,0,5,0,0,0,0,0,5,0,0,0,5,0	0	0	0	10	5	0,00	19,80	19,80

Оптимальный план перевозок (см. последнюю строку Табл. 3) радикально отличается от оптимального плана, полученного выше на основе утилитарного подхода к процессу оптимизации. Теперь все три станции выгрузки, относящиеся к малым портам (то есть Азов, Таганрог и Ейск), оказываются лишенными маршрутных поступлений в свой адрес. Значение суммарного времени перевозки оказалось существенно больше, чем в предыдущем случае. Несмотря на то, что согласно выражению логической связки (5) минимизация значений показателей  $T_1$  и  $T_2$  должна была осуществляться равноправно, в отношении показателя  $T_2$  получен

крайне неудовлетворительный результат (сравните с другой «крайностью», достигнутой ранее в рамках утилитарного подхода).

**4. Оптимизация с минимальными дополнительными ограничениями.** На основании анализа полученных выше (весьма предварительных) результатов остановимся на утилитарном подходе в отношении временных характеристик перевозочного процесса. То есть дальнейшие исследования будем проводить с рассмотрением показателя  $T$ . Вводимые далее дополнительные ограничения на множество  $D$  допустимых планов перевозок будут нежесткими и вполне естественными с точки зрения рассматриваемой транспортно-логистической ситуации. Начнем с самого «мягкого» ограничения, которое будет состоять в том, чтобы в адрес (всех в совокупности) станций выгрузки, относящихся к малым портам, а также в адрес (всех в совокупности) станций выгрузки, относящихся к глубоководным портам, направлялся хотя бы один маршрут. В Табл. 4 приведены 5 планов перевозок из 93 планов, полученных в процессе минимизации целевой функции  $T$ .

Таблица 4. Распределение маршрутов по станциям и значения показателей

№	Планы транспортировки	Количество отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					$T_1$	$T_2$	$T$
		<i>Азов</i>	<i>Таганрог</i>	<i>Ейск</i>	<i>Туапсе</i>	<i>Тамань</i>			
1	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,1,0,4	0	0	1	0	14	1,07	19,27	20,34
2	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,1,1,3	0	0	1	1	13	1,07	19,14	20,21
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
91	4,0,1,0,0,0,0,5,0,0,0,0,4,1,0	4	0	10	1	0	10,90	1,25	12,15
92	5,0,0,0,0,0,0,5,0,0,0,0,4,0,1	5	0	9	0	1	10,73	1,38	12,11
93	5,0,0,0,0,0,0,5,0,0,0,0,4,1,0	5	0	9	1	0	10,73	1,25	11,98

Оптимальный план перевозок (см. последнюю строку Табл. 4), а также значения показателей  $T_1$  и  $T_2$  стали несколько более сбалансированными, чем полученные в двух предыдущих случаях.

Далее несколько «ужесточим» ограничения на множество  $D$ , потребовав, чтобы в адрес каждой из пяти рассматриваемых припортовых станций был направлен хотя бы один маршрут. В Табл. 5 приведены 5 планов перевозок из 96 планов, полученных в процессе минимизации целевой функции  $T$ .

Таблица 5. Распределение маршрутов по станциям и значения показателей

№	Планы транспортировки	Количество отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					$T_1$	$T_2$	$T$
		Азов	Таганрог	Ейск	Туапсе	Тамань			
1	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,1,1,1,1,1	1	1	1	1	11	3,49	16,38	19,87
2	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,1,1,1,2,0	1	1	1	2	10	3,49	16,25	19,74
3	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,1,1,2,1,0	1	1	2	1	10	4,56	15,00	19,56
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
95	5,0,0,0,0,0,0,5,0,0,0,1,2,1,1	5	1	7	1	1	9,88	2,63	12,51
96	5,0,0,0,0,0,1,4,0,0,0,0,3,1,1	5	1	7	1	1	9,87	2,63	12,50

Оптимальный план перевозок (см. последнюю строку Табл. 5) и значения показателей  $T_1$  и  $T_2$  оказались еще более сбалансированными. Отметим, что в данном случае множество  $D$  существенно уже, чем в предыдущем случае. Поэтому минимальное значение временного показателя  $T$  равно 12,50 (суток) оказалось больше, чем полученное ранее и равно 11,98 (суток).

**5. Оптимизация с временным и стоимостным показателями.** Наряду с временными показателями перевозочного процесса рассмотрим классический стоимостный показатель, выражаемый целевой функцией вида:

$$c = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}. \quad (6)$$

Здесь  $c_{ij}$  – стоимость перевозки одного отправительского маршрута на участке между  $i$ -й станцией погрузки ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) и  $j$ -й станцией выгрузки ( $j = 1, 2, \dots, n$ ).

Показателем  $c$  выражается суммарная стоимость перевозки всех отправительских маршрутов, которые участвуют в реализации плана перевозок ( $x_{ij}$ ). Этот показатель допускает различные подходы и толкования с точки зрения рассматриваемых агентов и тесно связан не только с экономическими параметрами перевозки (транспортной составляющей в стоимости перевозимых товаров, затратами клиента, конкурентоспособностью используемого вида транспорта). Здесь также можно обратить внимание на использование агентами технологий ресурсосбережения.

Заметим, что разнородность показателей, рассматриваемых в рамках оптимизационной задачи, позволяет расширить спектр интересов, которые могут преследоваться агентами. Эти интересы могут носить организационный характер (например, в смысле достижения высокой степени ритмичности перевозок), а также относиться к экологической безопасности.

Каждому плану перевозок  $(x_{ij}) \in D$  поставим в соответствие вектор  $\{T, c\}$ , называемый вектором полезностей. Оптимальным назовем план перевозок  $(x_{ij}^*) \in D$  с вектором полезностей  $\{T^*, c^*\}$ , для которого не существует плана перевозок  $(x_{ij}) \in D$  такого, что координаты его вектора полезностей  $\{T, c\}$  удовлетворяют условию

$$(T < T^* \wedge c \leq c^*) \vee (T \leq T^* \wedge c < c^*). \quad (7)$$

Из выражения логической связки (7) видно, что в процессе оптимизации планов перевозок не происходит потери полезностей в отношении агентов, интересы которых выражаются показателями  $T$  и  $c$ .

Будем теперь предполагать, что на каждой из трех станций погрузки находится по 6 отправительских маршрутов с зерном. В Табл. 6 приведены 5 планов перевозок из 149 планов, представляющих собой «ступеньки» в «оптимизационной лестнице», приводящей к одному из оптимальных по Парето планов перевозок, получаемых в результате применения разработанного алгоритма.

Таблица 6. Распределение маршрутов по станциям и значения показателей

№	Планы транспортировки	Количество отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					$T_1$	$T_2$	$T$	$c$
		Азов	Таганрог	Ейск	Туапсе	Тамань				
1	0,0,0,0,6,0,0,0,0,6,1,1,1,1,2	1	1	1	1	14	3,49	20,51	24,00	27722,76
2	0,0,0,0,6,0,0,0,0,6,1,1,1,2,1	1	1	1	2	13	3,49	20,38	23,87	27600,12
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
147	6,0,0,0,0,5,0,1,0,0,2,1,0,2,1	13	1	1	2	1	11,59	3,88	15,47	21777,48
148	6,0,0,0,0,5,0,1,0,0,3,1,0,1,1	14	1	1	1	1	12,72	2,63	15,35	21777,48
149	6,0,0,0,0,5,1,0,0,0,3,0,1,1,1	14	1	1	1	1	12,71	2,63	15,34	21776,40

Содержащийся в последней строке Табл. 6 план перевозок представляет рациональную схему распределения грузопотоков, в которой (в той или иной степени) учитываются интересы таких агентов, как

владелец инфраструктуры, перевозчик, операторская и логистическая компании, клиент, а также интересы «зеленой» логистики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан подход в математическом моделировании распределений грузопотоков на железнодорожном полигоне, которые функционируют в рамках мультимодальных транспортно-технологических систем. Исходя из эгалитарной и утилитарной концепций в теории благосостояния, являющихся в проводимых исследованиях общей методологической основой, построена оптимизационная модель процесса грузоперевозок с временными и стоимостным показателями. Указанная модель представляет собой многокритериальную задачу транспортного типа, алгоритм решения которой в виде задачи целочисленного программирования реализован в программной среде системы аналитических вычислений. Разнородный характер целевых функций позволяет учитывать различные интересы, преследуемые агентами в процессе грузоперевозок. В качестве объекта применения разработанной методики исследования рассматривается система экспортных перевозок зерновых грузов в адрес портов Азово-Черноморского бассейна.

Проведена серия математических экспериментов, позволяющих провести сравнительный анализ результатов, полученных на основе эгалитарной и утилитарной концепций. Алгоритм решения оптимизационной задачи по своей конструкции вариативен и допускает рассмотрение дополнительных показателей другой природы, а также расширение спектра накладываемых ограничений. Предложенный подход в нахождении рациональных схем распределения грузопотоков, изучаемых в рамках регионального рынка транспортных услуг, имеет общий характер и, с учетом соответствующей специфики, применим к другим наземным видам транспорта.

### 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. Aulin V, Lyashuk O, Pavlenko O, et al. Realization of the Logistic Approach in the International Cargo Delivery System. *Communications - Scientific letters of the University of Zilina*. 2019;21(2):3-12. doi: 10.26552/com.C.2019.2.3-12
2. Krajcovic M, Grznar P, Fusko M, et al. Intelligent Logistics for Intelligent Production Systems. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*. 2018;20(4):16–23. doi: 10.26552/com.C.2018.4.16-23
3. Shramenko NY, Shramenko VO. Mathematical model of the logistics chain for the

- delivery of bulk cargo by rail transport. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018;5(167):136–141. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/15
4. Prachi A, Talari G. Multi-choice stochastic transportation problem involving logistic distribution. *Advances and Applications in Mathematical Sciences*. 2018;18(1):45-58. Доступно по: <https://www.proquest.com/docview/2195081117> Ссылка активна на: 08.03.2023.
  5. Pronello C, Camusso C and Valentina R. Last mile freight distribution and transport operators' needs: which targets and challenges? *Transportation Research Procedia*. 2017;25(0):888-899. doi:10.1016/j.trpro.2017.05.464
  6. Elbert R, Müller JP, Rentschler J. Tactical network planning and design in multimodal transportation – A systematic literature review. *Research in Transportation Business & Management*, 2020;35:100462. doi: 10.1016/j.rtbm.2020.100462
  7. Копытов Е, Abramov D. Multiple-criteria analysis and choice of transportation alternatives in multimodal freight transport system. *Transport and Telecommunication Journal*. 2012;13(2):148-158. doi:10.2478/v10244-012-0012-x
  8. Yannis G, Kopsacheili A, Dragomanovits A, et al. State-of-the-art review on multi-criteria decision-making in the transport sector. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2020;7:413–431. doi:10.1016/j.jtte.2020.05.005
  9. Kabashkin I. Heuristic Based Decision Support System for Choice of Alternative Routes in the Large-Scale Transportation Transit System on the Base of Petri Net Model. *Procedia Engineering*. 2016;134:359-364. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.020
  10. Чеченова Л.М. Обоснование решений в области цифровизации контейнерных сервисов Октябрьской железной дороги // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 126–139. [Chechenova LM. Substantiation of solutions in the field of digitalization of container services of the Oktyabrskaya railway. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):126-139. (In Russ.). doi: 10.17816/transsyst202284126-139
  11. Yee H, Gijbrecchts J, Boute R. Synchromodal transportation planning using travel time information. *Computers in Industry*. 2021;125:103367. doi: 10.1016/j.compind.2020.103367.
  12. Jarašūnienė A, Batarlienė N, Vaičiūtė K. Application and Management of Information Technologies in Multimodal Transportation. *Procedia Engineering*. 2016;134:309-315. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.012
  13. Guimarães AG, Gonçalves AD. Maia Challenges and Innovation Opportunities in Load Multimodal Transport - LMT in Brazil: cluster technique application as a support tool for Decision Making. *Transportation Research Procedia*. 2017;25:870–887. doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.463
  14. Koohathongsumrit N, Meethom W. An integrated approach of fuzzy risk assessment model and data envelopment analysis for route selection in multimodal transportation networks. *Expert Systems with Applications*. 2021;171:114342. doi: 10.1016/j.eswa.2020.114342
  15. Bogachev VA, Kravets AS, Bogachev TV. Mathematical experiment as a tool for modeling the freight transportation process. *Journal of Physics: Conference series*. 2021;2131(2):022094. doi: 10.1088/1742-6596/2131/2/022094

**Сведения об авторах:**

**Богачев Виктор Алексеевич**, к.ф.-м.н. доцент;  
eLibrary SPIN:2125-5198; ORCID: 0000-0003-1202-7318;  
E-mail: bogachev-va@yandex.ru

**Кравец Александра Сергеевна**, к.т.н.;  
eLibrary SPIN:9591-3729; ORCID: 0000-0001-7371-7158;  
E-mail: kravec\_as@mail.ru

**Богачев Тарас Викторович**, к.ф.-м.н., доцент;  
eLibrary SPIN:2262-0080; ORCID: 0000-0001-9641-0116;  
E-mail: bogachev73@yandex.ru

**Information about the authors:**

**Viktor A. Bogachev**, candidate of Physical and Mathematical Sciences, assistant professor;  
eLibrary SPIN:2125-5198; ORCID: 0000-0003-1202-7318;  
E-mail: bogachev-va@yandex.ru

**Aleksandra S. Kravets**, candidate of technical sciences;  
eLibrary SPIN:9591-3729; ORCID: 0000-0001-7371-7158;  
E-mail: kravec\_as@mail.ru

**Taras V. Bogachev**, candidate of Physical and Mathematical Sciences, assistant professor;  
eLibrary SPIN:2262-0080; ORCID: 0000-0001-9641-0116;  
E-mail: bogachev73@yandex.ru

**Цитировать:**

Богачев В.А., Кравец А.С., Богачев Т.В. Математический эксперимент в логистических исследованиях мультимодальных грузоперевозок с временными и стоимостными показателями // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 1. – С. 108–121. doi: 10.17816/transsyst202391108-121

**To cite this article:**

Bogachev VA, Kravets AS, Bogachev TV. Mathematical experiment in logistics research of multimodal freight transportation with time and cost indicators. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):108-121. doi: 10.17816/transsyst202391108-121

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

УДК [UDC] 539.374

DOI 10.17816/transsyst202391122-134

© Е.А. Лямина<sup>1</sup>, О.В. Новожилова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

<sup>2</sup> Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана  
(Москва, Россия)

## ДИЗАЙН РАВНОПРОЧНОГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ДИСКА

**Обоснование:** Вращающиеся диски, например маховики, являются неотъемлемой частью двигателей, что требует развития теоретических методов анализа и дизайна таких дисков.

**Цель:** Определение профиля равнопрочного вращающегося диска.

**Материалы и методы:** Методы математической теории упругости и пластичности.

**Результаты:** Методика определения профиля равнопрочного вращающегося диска, подчиняющегося условию пластичности Мизеса, и ее применение.

**Заключение:** Разработанная методика может быть использована для дизайна равнопрочных вращающихся дисков, подверженных действию различных комбинаций величин давления на внешнем и внутреннем радиусах. Методика может быть распространена на более общие условия пластичности.

**Ключевые слова:** равнопрочный диск, вращающийся диск, аналитическое решение.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Mathematical modeling, numerical methods and software packages

© Е.А. Lyamina<sup>1</sup>, O.V. Novozhilova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University  
(Moscow, Russia)

## DESIGN OF EQUI-STRENGTH ROTATING DISK

**Background:** Rotating disks, such as flywheels, are an important machine part of engines, which requires the development of the theoretical methods of their analysis and design.

**Aim:** Determination of the profile of equi-strength rotating disks.

**Materials and Methods:** Methods of the mathematical theory of elasticity and plasticity

**Results:** Methodology for determining the profile of equi-strength rotating disks obeying the von Mises yield criterion and its application

**Conclusion:** The methodology developed can be used to design equi-strength rotating disks subject to various combinations of internal and external pressures. It can be extended to more general yield criteria.

**Key words:** equi-strength disk, rotating disk, analytical solution.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Вращающиеся диски находят широкое применение в различных отраслях промышленности [1–6]. Характерным примером их использования в транспортном машиностроении являются маховики. В связи с этим, развитию теоретических методов анализа и дизайна вращающихся дисков посвящено большое количество исследований.

Определение осесимметричного напряженно-деформированного состояния для дисков постоянной толщины для различных условий пластичности выполнено в [7]. Однако, в инженерных приложениях часто применяются диски переменной толщины. В большинстве случаев, изменение толщины диска вдоль его радиуса задано. Например, в [8–12] принимается, что изменение толщины подчиняется экспоненциальному закону. В [9] и [10] также используется степенная функция для описания профиля диска. Однако определение профиля равнопрочного диска предполагает, что зависимость толщины диска от радиуса должна быть получена из решения. Общие проблемы дизайна дисков изложены в [11]. Одно из первых решений по определению профиля равнопрочного вращающегося диска без учета давления на радиусах получено в [12]. Дизайн неоднородных равнопрочных дисков, подверженных внешнему и внутреннему давлению, выполнен в [13, 14]. В обеих работах предполагается справедливым условие пластичности Треска. В публикуемой работе разрабатывается и применяется методика определения профиля равнопрочного вращающегося диска, подверженного внутреннему и внешнему давлению. Материал диска подчиняется условию пластичности Мизеса. Решение получено в элементарных функциях. Этому способствует замена радиальной координаты некоторой другой переменной. Такие замены успешно применялись при решении сферически симметричных краевых задач [15–17]. Решение получено в условиях плосконапряженного состояния. Приемлемость этого условия зависит от скорости изменения толщины диска вдоль радиуса. Очевидно, что однозначная количественная оценка применимости условий плосконапряженного состояния невозможна. Предлагаемая методика включает оценку применимости условий плосконапряженного состояния исходя из принятых в литературе критериев [18, 19].

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Полый вращающийся диск внутреннего радиуса  $a_0$  и внешнего радиуса  $b_0$  нагружен равномерными давлениями  $P_a$  и  $P_b$  по внутреннему и внешнему радиусам, соответственно (Рис.1). Угловая скорость диска равна  $\omega$ . Угловым ускорением пренебрегаем. Материал диска подчиняется закону Гука и условию пластичности Мизеса. Краевая задача является осесимметричной. Поэтому, целесообразно ввести цилиндрическую систему координат  $(r, \theta, z)$ , ось  $z$  которой совпадает с осью симметрии диска. Толщина диска варьируется в радиальном направлении. Однако, предполагается, что плосконапряженное состояние является приемлемой аппроксимацией.

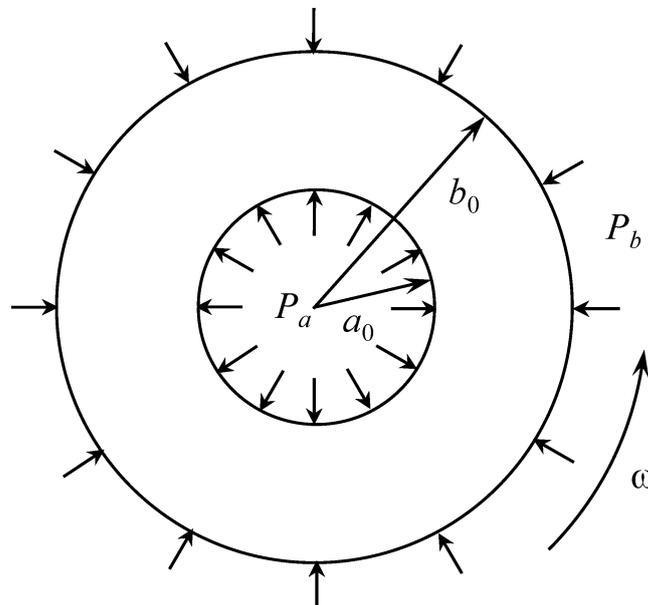


Рис. 1. Вращающийся диск, нагруженный внутренним и внешним давлением

Компоненты тензора напряжения в цилиндрической системе координат обозначим  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_z$ . Эти напряжения являются главными. Поэтому,  $\sigma_z = 0$  в условиях плосконапряженного состояния. Тогда, закон Гука принимает вид

$$E\varepsilon_r = \sigma_r - \nu\sigma_\theta, \quad E\varepsilon_\theta = \sigma_\theta - \nu\sigma_r, \quad E\varepsilon_z = -\nu(\sigma_r + \sigma_\theta). \quad (1)$$

Здесь  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_\theta$ ,  $\varepsilon_z$  - компоненты тензора деформации в цилиндрической системе координат,  $E$  - модуль Юнга и  $\nu$  - коэффициент Пуассона. Условие пластичности Мизеса в рассматриваемом случае имеет форму

$$\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_r \sigma_\theta = \sigma_0^2. \quad (2)$$

Здесь  $\sigma_0$  - предел пластичности при одноосном растяжении.

Удобно ввести следующие безразмерные величины:

$$s_r = \frac{\sigma_r}{\sigma_0}, \quad s_\theta = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_0}, \quad \rho = \frac{r}{b_0}, \quad a = \frac{a_0}{b_0}, \quad p_a = \frac{P_a}{\sigma_0}, \quad p_b = \frac{P_b}{\sigma_0}, \quad (3)$$

$$k = \frac{\sigma_0}{E}, \quad \Omega = \frac{\nu \omega^2 b_0^2}{\sigma_0}.$$

Здесь  $\nu$  - плотность материала.

Используя (3), первые два уравнения в (1) преобразуются к виду

$$\varepsilon_r = k(s_r - \nu s_\theta), \quad \varepsilon_\theta = k(s_\theta - \nu s_r), \quad (4)$$

а уравнение (2) к виду

$$s_r^2 + s_\theta^2 - s_r s_\theta = 1. \quad (5)$$

Учитывая (3), единственное уравнение движения, которое не удовлетворяется автоматически, имеет форму

$$\frac{d(h\rho s_r)}{d\rho} - h(s_\theta - \rho^2 \Omega) = 0. \quad (6)$$

Здесь  $h$  – толщина диска. В решении удобно использовать величину:

$$t = \ln\left(\frac{h}{h_b}\right). \quad (7)$$

Здесь  $h_b$  - толщина диска при  $r = b_0$  (или  $\rho = 1$ ). Тогда уравнение (6) примет вид

$$\rho \frac{dt}{d\rho} + \rho \frac{ds_r}{d\rho} + s_r - s_\theta + \rho^2 \Omega = 0. \quad (8)$$

Уравнение совместности деформаций в рассматриваемом случае имеет форму:

$$\frac{d(\rho \varepsilon_0)}{d\rho} = \varepsilon_r. \quad (9)$$

Используя (3) и (7), граничные условия могут быть сформулированы как

$$s_r = -p_b \quad (10)$$

при  $\rho = 1$  или  $t = 0$  и

$$s_r = -p_a \quad (11)$$

при  $\rho = a$  или  $t = t_a = \ln(h_a/h_b)$ . Здесь  $h_a$  - толщина диска при  $r = a_0$  (или  $\rho = a$ ).

Задача дизайна состоит в нахождении профиля равнопрочного диска.

### 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В РАВНОПРОЧНОМ ДИСКЕ

#### 3.1 Общее решение

В равнопрочном диске условие пластичности выполняется во всем диске. Это условие удовлетворяется стандартной подстановкой:

$$s_r = -\frac{2 \sin \psi}{\sqrt{3}} \quad \text{и} \quad s_\theta = -\frac{\sin \psi}{\sqrt{3}} - \cos \psi. \quad (12)$$

Здесь  $\psi$  - новая неизвестная функция  $\rho$ . При этом,  $\psi = \psi_a$  при  $\rho = a$  и  $\psi = \psi_b$  при  $\rho = 1$ . Подставляя (12) в (8), найдем

$$\rho \frac{dt}{d\rho} - \frac{2\rho \cos \psi}{\sqrt{3}} \frac{d\psi}{d\rho} + \cos \psi - \frac{\sin \psi}{\sqrt{3}} + \rho^2 \Omega = 0. \quad (13)$$

Исключая  $s_r$  и  $s_\theta$  в (4) с помощью (12) и подставляя полученные соотношений в (9), приходим к уравнению для определения  $\psi$  в виде

$$\left[ \sin \psi - \frac{(1-2\nu) \cos \psi}{\sqrt{3}} \right] \frac{\rho d\psi}{d\rho} = (1+\nu) \left( \cos \psi - \frac{\sin \psi}{\sqrt{3}} \right). \quad (14)$$

Это уравнение позволяет выразить производную  $d\psi/d\rho$  как функцию  $\rho$ . Исключая эту производную в (13), получим:

$$\frac{dt}{d\rho} = \frac{(\sqrt{3} \cos \psi - \sin \psi)^2}{\rho [\sqrt{3} \sin \psi - (1 - 2\nu) \cos \psi]} - \rho \Omega. \quad (15)$$

В этом уравнении можно перейти от дифференцирования по  $\rho$  к дифференцированию по  $\psi$  с помощью (14). Тогда,

$$\frac{dt}{d\psi} (1 + \nu) = \sqrt{3} \cos \psi - \sin \psi - \rho^2 \Omega \frac{[\sqrt{3} \sin \psi - (1 - 2\nu) \cos \psi]}{(\sqrt{3} \cos \psi - \sin \psi)}. \quad (16)$$

Уравнения (14) и (16) могут быть решены последовательно. В частности, решение уравнения (14), удовлетворяющее условию  $\psi = \psi_b$  при  $\rho = 1$ , имеет вид:

$$\rho = \sqrt{\frac{\sqrt{3} \cos \psi_b - \sin \psi_b}{\sqrt{3} \cos \psi - \sin \psi}} \exp \left[ \frac{\sqrt{3}(1 - \nu)}{2(1 + \nu)} (\psi_b - \psi) \right]. \quad (17)$$

Исключая  $\rho$  в уравнении (16) с помощью (17), найдем

$$\begin{aligned} \frac{dt}{d\psi} (1 + \nu) = \sqrt{3} \cos \psi - \sin \psi - \\ - \Omega \frac{(\sqrt{3} \cos \psi_b - \sin \psi_b) [\sqrt{3} \sin \psi - (1 - 2\nu) \cos \psi]}{(\sqrt{3} \cos \psi - \sin \psi)^2}. \end{aligned} \quad (18)$$

Решение этого уравнения, удовлетворяющее условию  $t = 0$  при  $\psi = \psi_b$ , имеет вид:

$$\begin{aligned} t = \frac{(\sqrt{3} \sin \psi + \cos \psi - \sqrt{3} \sin \psi_b - \cos \psi_b)}{(1 + \nu)} - \\ - \Omega \left\langle \frac{\sqrt{3}(1 - \nu)}{2(1 + \nu)} (\sqrt{3} \cos \psi_b - \sin \psi_b) \left\{ \operatorname{arth} \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} \left( \frac{\psi_b}{2} \right) \right) \right] - \operatorname{arth} \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} \left( \frac{\psi}{2} \right) \right) \right] \right\} + \right. \\ \left. \frac{(\sqrt{3} \cos \psi_b - \sin \psi_b)}{2(\sqrt{3} \cos \psi - \sin \psi)} - \frac{1}{2} \right\rangle \end{aligned} \quad (19)$$

Это решение совместно с (7) и (17) определяет зависимость толщины равнопрочного диска от радиуса в параметрической форме. Распределение

компонент тензора напряжения по радиусу можно найти из (12) и (17) также в параметрической форме. Отсюда следует, что нельзя произвольно задать  $p_b$  и  $p_a$ , входящие в (10) и (11).

### 3.2. Особое решение

Уравнение (14) имеет особые решения

$$\psi = \psi_s = \frac{\pi}{3} \quad \text{и} \quad \psi = \psi_s = -\frac{2\pi}{3}. \quad (20)$$

В этих случаях уравнение (15) сводится к

$$\frac{dt}{d\rho} + \rho\Omega = 0. \quad (21)$$

Решение этого уравнения, удовлетворяющее условию  $t=0$  при  $\rho=1$ , имеет вид

$$t = \frac{\Omega}{2}(1-\rho^2). \quad (22)$$

Из (12) и (20) следует, что компоненты тензора напряжения постоянны во всем диске. В частности, из (10) - (12) получаем

$$p_a = p_b = \pm 1. \quad (23)$$

Толщина равнопрочного диска определяется из (7) и (22) как

$$h = h_b \exp\left[\frac{\Omega}{2}(1-\rho^2)\right]. \quad (24)$$

## 4. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ РЕШЕНИЯ

Предположение о плосконапряженном состоянии приемлемо, если только толщина диска изменяется достаточно плавно. Это условие можно сформулировать как

$$\left|\frac{dh}{dr}\right| \leq \delta, \quad (25)$$

где  $\delta$  - заданное число. Используя (3) и (7), условие (25) можно представить в виде

$$\left| \frac{dh}{h_b d\rho} \right| \leq \delta \frac{b_0}{h_b} = \Delta \quad \text{или} \quad \left| \frac{dt}{d\rho} \right| e^t \leq \delta \frac{b_0}{h_b} = \Delta. \quad (26)$$

Обычно принимается, что величина  $\Delta$  может быть равна нескольким десяткам [18, 19].

Рассмотрим особое решение. Подставляя (24) в первое уравнение в (26), получим

$$\Omega \rho \exp \left[ \frac{\Omega}{2} (1 - \rho^2) \right] \leq \Delta. \quad (27)$$

Левая сторона этого неравенства достигает максимума при  $\rho = 1/\sqrt{\Omega}$ . Таким образом, максимально возможные значения  $\Omega$  определяются из (27) как

$$\sqrt{\Omega_m} \exp \left[ \frac{1}{2} (\Omega_m - 1) \right] = \Delta \quad (28)$$

при  $1 \leq \Omega_m \leq 1/a^2$ ,

$$\Omega_m = \Delta \quad (29)$$

при  $\Omega_m < 1$ ,

$$a \Omega_m \exp \left[ \frac{\Omega_m}{2} (1 - a^2) \right] = \Delta \quad (30)$$

при  $\Omega_m > 1/a^2$ . Как отмечено выше, допустимые значения величины  $\Delta$  значительно превышают единицу. В связи с этим, решение (29) не имеет существенного значения для приложений. Иллюстрация решений (28) и (30) представлена на Рис. 2 для нескольких значений  $\Delta$ .

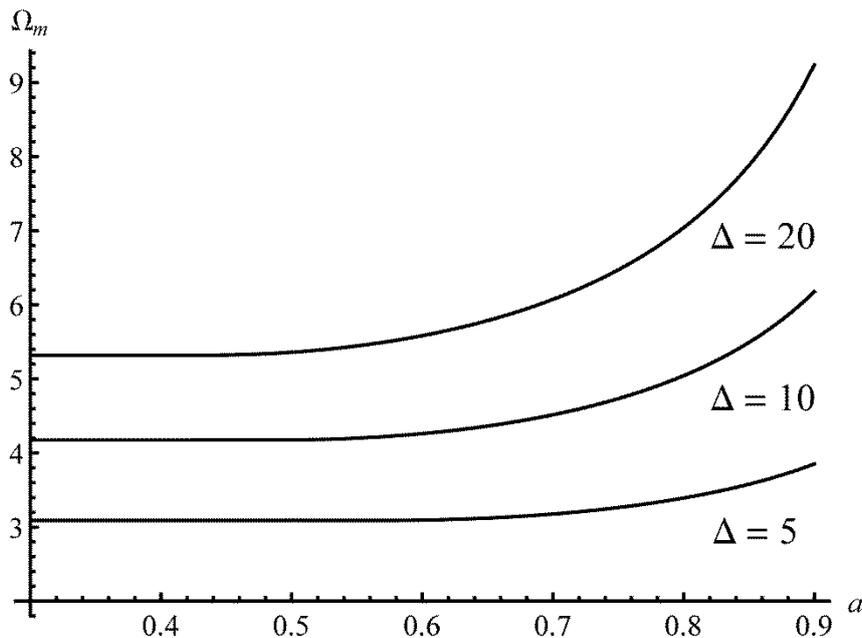


Рис. 2. Иллюстрация условия применимости особого решения

Рассмотрим общее решение. Производная  $dt/dr$  определяется как функция  $\psi$  с помощью (15) и (17). Величина  $t$  определяется из (19) тоже как функция  $\psi$ . Подставляя эти выражения во вторую формулу в (26), можно проверить выполнение неравенства в любой точке диска.

## 5. ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ ДИЗАЙН ДИСКА

Уравнение (17) позволяет найти связь между  $\psi_a$  и  $\psi_b$ . При этом, необходимо иметь ввиду особое решение (20) и величины

$$\psi = \psi_c^{(1)} = \arctg \frac{(1-2\nu)}{\sqrt{3}} \quad \text{и} \quad \psi = \psi_c^{(2)} = \arctg \frac{(1-2\nu)}{\sqrt{3}} - \pi, \quad (31)$$

при которых коэффициент при производной в (14) обращается в ноль. Обе величины,  $\psi_a$  и  $\psi_b$ , должны находиться внутри одного из следующих интервалов:  $(\psi_c^{(2)}, -2\pi/3)$ ,  $(-2\pi/3, \psi_c^{(1)})$ ,  $(\psi_c^{(1)}, \pi/3)$ ,  $(\pi/3, \psi_c^{(1)} + \pi)$ . Знак производной  $d\psi/dr$  в каждом из этих интервалов можно найти из уравнения (14). Этот знак позволяет установить какое неравенство,  $\psi_a > \psi_b$  или  $\psi_a < \psi_b$ , выполняется в каждом интервале. Общая структура решения показана на Рис. 3.

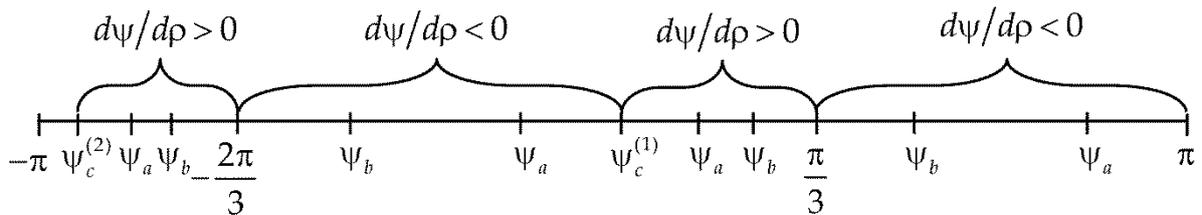
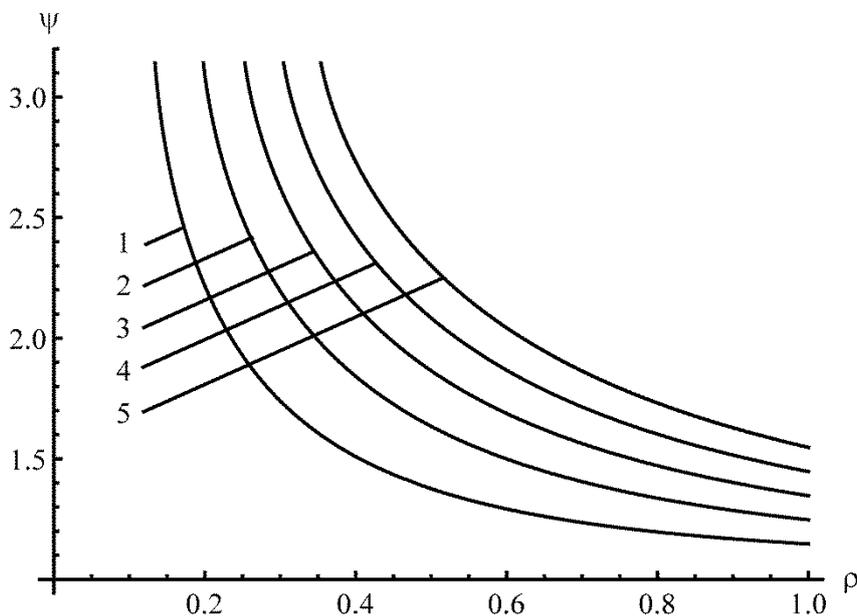


Рис. 3. Общая структура решения уравнения (14)

В качестве примера, на Рис. 4 построены зависимости  $\psi$  от  $\rho$  для нескольких значений  $\psi_b$  из интервала  $(\pi/3, \psi_c^{(1)} + \pi)$ . На этом рисунке кривая 1 соответствует  $\psi_b = \pi/3 + .1$ , кривая 2 -  $\psi_b = \pi/3 + .2$ , кривая 3 -  $\psi_b = \pi/3 + .3$ , кривая 4 -  $\psi_b = \pi/3 + .4$ , кривая 5 -  $\psi_b = \pi/3 + .5$ . Эти и все последующие расчеты выполнены при  $\nu = 0.3$ . С помощью этих расчетов можно определить требуемое давление на внешнем радиусе при заданных давлении на внутреннем радиусе и величине  $a$ . Пусть внутренний радиус свободен от напряжений. Тогда,  $\psi_a = \pi$ . Соответствующая величина  $\psi_b$  определяется из (17) при заданной величине  $a$ . Давление на внешнем радиусе вычисляется по формуле в (12). На рисунке 5 показана зависимость этого давления от  $a$ . Предположим, что требуется выполнить дизайн диска при  $a = 1/2$ .

Рис. 4. Радиальное распределение значения угла  $\psi$ 

Тогда из решения на Рис. 5 следует, что  $\psi_b = 1.852$  и  $s_b = -1.11$ . Профиль диска вычисляется из (17) и (19). Этот профиль показан на Рис.6 при  $\Omega = 5$ . На Рис.7 показано распределение величины  $q = |dt/d\rho|e^t$ , входящей в (26).

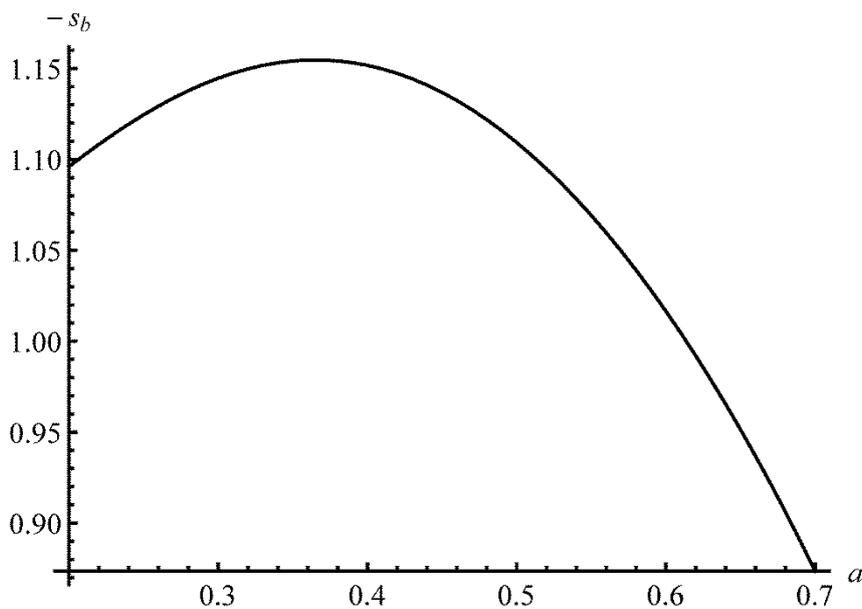
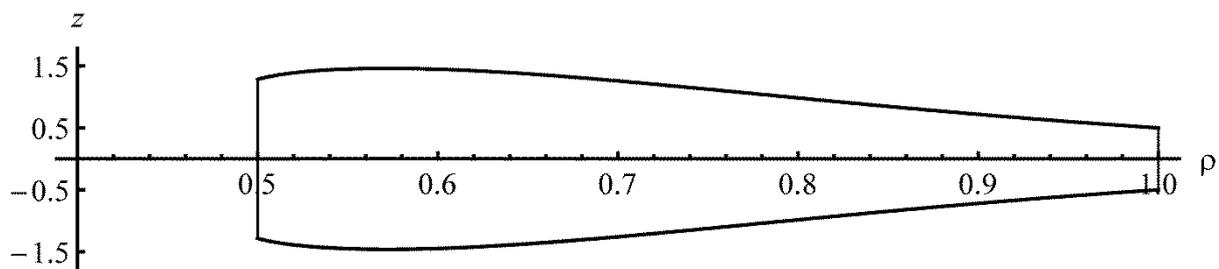
Рис. 5. Зависимость давления на внешнем радиусе от величины  $a$ 

Рис. 6. Профиль равнопрочного диска

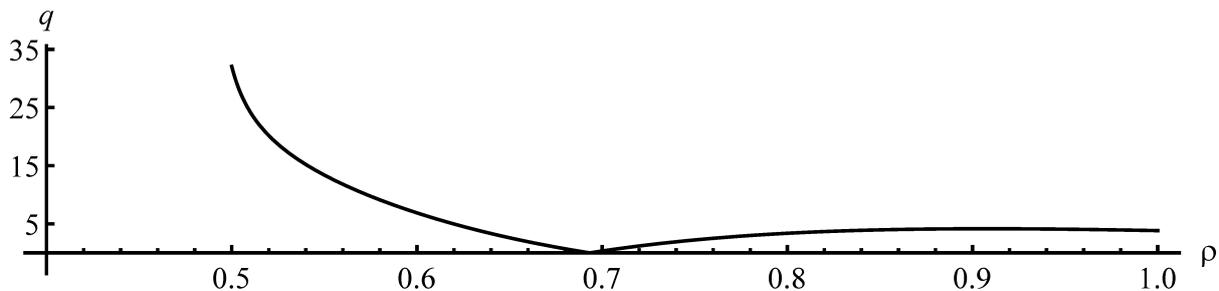


Рис. 7. Иллюстрация условия применимости решения

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика определения профиля равнопрочного вращающегося диска, материал которого подчиняется условию пластичности Мизеса. Решение получено в элементарных функциях, что оказалось возможным благодаря выбору вспомогательной переменной  $\psi$  в качестве независимой переменной вместо радиальной координаты. Методика включает проверку приемлемости предположения о

плосконапряженном состоянии. Приводится пример расчета профиля равнопрочного вращающегося диска.

Разработанная теория может быть использована для дизайна маховиков, широко применяемых в транспортном машиностроении.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-21-00335).

### 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. Genta G, Bassani D. Use of Genetic Algorithms For the Design of Rotors. *Meccanica*. 1995;30:707–717. doi: 10.1007/BF00986575
2. Parmaksizog˘lu C, Güven U. Plastic Stress Distribution in a Rotating Disk with Rigid Inclusion Under a Radial Temperature Gradient. *Mechanics of Structures and Machines: An International Journal*. 1998;26:19-20. doi: 10.1080/08905459808945417
3. Orcan Y, Eraslan AN. Elastic–Plastic Stresses in Linearly Hardening Rotating Solid Disks of Variable Thickness. *Mechanics Research Communications*. 2002;29(4):269–281. doi: 10.1016/S0093-6413(02)00261-6.
4. Eraslan AN. Stress Distributions In Elastic-Plastic Rotating Disks with Elliptical Thickness Profiles Using Tresca and Von Mises Criteria. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2005;85:252-266. doi: 10.1002/zamm.200210177
5. Jalali MH, Jalali MR. Stress Analysis of Rotating Functionally Graded Polar Orthotropic Disk Under Thermomechanical Loading. *Journal of Vibroengineering*. 2020;22(3):640–656. doi: 10.21595/jve.2019.20575
6. Сёмка Э.В. Качественный и количественный анализ упругопластического состояния вращающегося тонкого диска // Вестник Инженерной школы ДВФУ. – 2022. – №4(53). – С. 3–12. [Syomka EV. Qualitative and quantitative analysis of the elastoplastic state of a rotating thin disk. *Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin*. 2022;4(53):3-12. (In Russ).] Ссылка активна на: 18.03.2023. Доступно по: <https://journals.dvfu.ru/vis/article/view/388>
7. Alexandrov S. Elastic/plastic discs under plane stress conditions. Springer, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-14580-8
8. Paul SK, Sahni M. Stress Analysis of Functionally Graded Disk with Exponentially Varying Thickness Using Iterative Method. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. 2021;16:232-244. doi: 10.37394/232011.2021.16.26
9. Sharma D, Kaur R, Sharma H. Investigation of Thermo-Elastic Characteristics in Functionally Graded Rotating Disk Using Finite Element Method. *Nonlinear Engineering*. 2021;10:312-322. doi: 10.1515/nleng-2021-0025
10. Madan R, Bhowmick S. Limit Elastic Analysis of Functionally Graded Rotating Disks Under Thermo-Mechanical Loading. *Int J Appl Mech*. 2021;13:Article 2150033. doi: 10.1142/S1758825121500332

11. Seireg A, Surana KS. Optimum Design of Rotating Disks. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*. 1970;92(1):1-10. doi: 10.1115/1.3427709
12. Gontarovskii VP, Chebaevskii BP. Profile design of uniform-strength disk by the Mises strength rule. *Strength of Materials*. 1973;5(10):1257-1259. doi: 10.1007/BF01129410
13. Hein K, Heinloo M. The Design of Nonhomogeneous Equi-Strength Annular Discs of Variable Thickness Under Internal And External Pressures. *Int J Solids Struct*. 1990;26(5/6):617-630. doi: 10.1016/0020-7683(90)90033-R
14. Gau CY, Manoochehri S. Optimal Design of a Nonhomogeneous Annular Disk Under Pressure Loadings. *ASME Journal of Mechanical Design*. 1994;116:989-996. doi: 10.1115/1.2919509
15. Durban D, Baruch M. Analysis Of an Elasto-Plastic Thick Walled Sphere Loaded By Internal and External Pressure. *Int J Nonlinear Mech*. 1977;12: 9-21. doi: 10.1016/0020-7462(77)90012-9
16. Alexandrov S, Pirumov A, Jeng YR. Expansion/Contraction of a Spherical Elastic/Plastic Shell Revisited. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2015; 27: 483-94. doi: 10.1007/s00161-014-0365-6
17. Alexandrov S, Jeng YR. An Elastic/Plastic Solution for a Hollow Sphere Subject to Thermo-Mechanical Loading Considering Temperature Dependent Material Properties. *Int J Solids Struct*. 2020;200-201:23-33. doi: :10.1016/j.ijsolstr.2020.03.027
18. Bayat M, Saleem M, Sahari BB, Hamouda AMS, Mahdi E. Mechanical and Thermal Stresses in A Functionally Graded Rotating Disk with Variable Thickness Due to Radially Symmetry Loads. *Int J Pres Ves Pip*. 2009;86:357-72. doi: 10.1016/j.ijpvp.2008.12.006
19. Vivio F, Vullo V, Cifani P. Theoretical Stress Analysis of Rotating Hyperbolic Disk Without Singularities Subjected to Thermal Load. *Journal of Thermal Stresses*. 2014;37:117-36. doi: 10.1080/01495739.2013.839526

**Сведения об авторах:**

**Лямина Елена Алексеевна**, к.ф.-м.н.;  
eLibrary SPIN: 6801-0244; ORCID: 0000-0002-7319-8703;  
E-mail: lyamina@inbox.ru

**Новожилова Ольга Валерьевна**, к.ф.-м.н.;  
eLibrary SPIN: 8995-7637; ORCID: 0000-0002-9361-0478;  
E-mail: helgam@bk.ru

**Information about the authors:**

**Elena A. Lyamina**, PhD, associated professor;  
eLibrary SPIN: 6801-0244; ORCID: 0000-0002-7319-8703;  
E-mail: lyamina@inbox.ru

**Olga V. Novozhilova**, PhD;  
eLibrary SPIN: 8995-7637; ORCID: 0000-0002-9361-0478;  
E-mail: helgam@bk.ru

**Цитировать:**

Лямина Е.А., Новожилова О.В. Дизайн равнопрочного вращающегося диска // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 1. – С. 122–134. doi: 10.17816/transsyst202391122-134

**To cite this article:**

Lyamina EA, Novozhilova OG. Design of equi-strength rotating disk. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):122-134. doi: 10.17816/transsyst202391122-134

УДК [UDC] 656.025.6

DOI 10.17816/transsyst202391135-145

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

© С.А. Смирнов, О.Ю. Смирнова

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

## СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ИНВЕСТИЦИЙ НА ТРАНСПОРТЕ

**Обоснование:** Транспорт играет важнейшую роль в социально-экономических и общественных процессах. Несмотря на то, что транспорт можно рассматривать как самостоятельную отрасль, а проекты развития транспорта – как самостоятельные бизнес-проекты, спектр влияния транспорта до сих пор не изучен в полной мере. Качественное рассмотрение сфер влияния транспорта показывает его воздействие на все значимые аспекты социально-экономических отношений в обществе.

Тем не менее для оценки эффективности инвестиций в транспорт используются классические методы финансового менеджмента, не позволяющие в полной мере отразить эффекты, возникающие в результате осуществления таких инвестиций.

Как показывает практика, использование классических подходов не позволяет достоверно оценить эффективность инвестиций в транспорт. Выбор подходов к оценке находится в прямой зависимости от социально-экономической модели государства. Капиталистическая модель сфокусирована на получаемом доходе от реализации любого инвестиционного проекта, тогда как свойственная России социально ориентированная модель исходно ориентирована на формирование общественного блага.

Последний подход, по нашему мнению, является стратегически более выгодным в масштабах государства и требует широкого распространения для целей финансово-экономического анализа.

**Цель:** рассмотреть перечень методы оценки инвестиций в транспорт и определить набор факторов, требующих учета для социально ориентированной экономики.

**Материалы и методы:** методология исследования построена на анализе методов финансово-экономической оценки инвестиционных проектов, социально-экономического анализа, а также макроэкономических методов. Информационная база исследования опирается на официальную правовую и методическую информацию органов власти Российской Федерации.

**Результаты:** в результате исследования определен перечень факторов, требующих учета при оценке эффективности инвестиций в транспорт в рамках парадигмы социально ориентированного государственного управления.

**Заключение:** исследование подтверждает, что используемые в настоящее время методы оценки эффективности инвестиций в транспорт не в полной мере отражают эффекты, возникающие при их реализации. Предложенный подход к определению перечня социально-экономических эффектов, возникающих в результате влияния

транспортных проектов, позволит повысить качество управленческих решений в транспортной сфере.

**Ключевые слова:** оценка экономической эффективности, косвенные эффекты, новые подходы, глобальные изменения, магнитолевитационный транспорт.

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© S.A. Smirnov, O.Yu. Smirnova

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

## SOCIO-ECONOMIC APPROACH TO TRANSPORT INVESTMENTS EVALUATION

**Background:** Transport plays a crucial role in socio-economic and social processes. Despite the fact that transport can be considered as an independent industry, and transport development projects can be considered as independent business projects, the spectrum of transport influence has not yet been fully studied. A qualitative examination of the spheres of influence of transport shows its impact on all significant aspects of socio-economic relations in society.

Nevertheless, classical methods of financial management are used to assess the effectiveness of investments in transport, which do not allow to fully reflect the effects arising from the implementation of such investments.

As practice shows, the use of classical approaches does not allow us to reliably assess the effectiveness of investments in transport. The choice of approaches to assessment is directly dependent on the socio-economic model of the state. The capitalist model focuses on the income received from the implementation of any investment project, whereas the socially oriented model peculiar to Russia is initially focused on the formation of the public good.

The latter approach, in our opinion, is strategically more advantageous on a national scale and requires wide dissemination for the purposes of financial and economic analysis

**Aim:** to consider the list of methods for evaluating investments in transport and determine a set of factors that require consideration for a socially oriented economy.

**Materials and methods:** the research methodology is based on the analysis of methods of financial and economic evaluation of investment projects, socio-economic analysis, as well as macroeconomic methods. The information base of the study is based on official legal and methodological information of the authorities of the Russian Federation.

**Results:** as a result of the study, a list of factors that need to be taken into account when assessing the effectiveness of investments in transport within the framework of the paradigm of socially oriented public administration is determined.

**Conclusion:** the study confirms that the methods currently used to assess the effectiveness of investments in transport do not fully reflect the effects arising from their implementation. The proposed approach to determining the list of socio-economic effects resulting from the impact of transport projects will improve the quality of management decisions in the transport sector.

**Key words:** economic efficiency assessment, side effects, new approaches, public economy, global changes, magnetic levitation transport.

## ВВЕДЕНИЕ

Деятельность транспорта является важнейшей основой для комплексного и устойчивого функционирования территорий. Качество развития транспортной сферы определяет эффективность производственных, экономических и социальных процессов.

В последние десятилетия наблюдается постоянный рост мирового ВВП. Данная тенденция была нарушена только дважды: во время мирового финансового кризиса 2008-2009 гг. и в период пандемии 2020 г. Однако уже в 2022 г. мировой ВВП превысил отметку в 100 трлн долларов и увеличился на 7,5 трлн долларов по сравнению с 2021 г. [1]. При этом продолжает усиливаться разрыв в неравенстве доходов между социальными группами (Рис. 1). Доля глобального дохода, получаемая 10 % богатейших людей в мире, колебалась в пределах 50–60 % в период между 1820 г. и 2020 г. (61 % в 2000 г., 55 % в 2020 г.), в то время как доля глобального дохода, получаемая 50 % беднейшего населения, составляла около 10 % или ниже (6 % в 2000 г., 7 % в 2020 г.) [2].

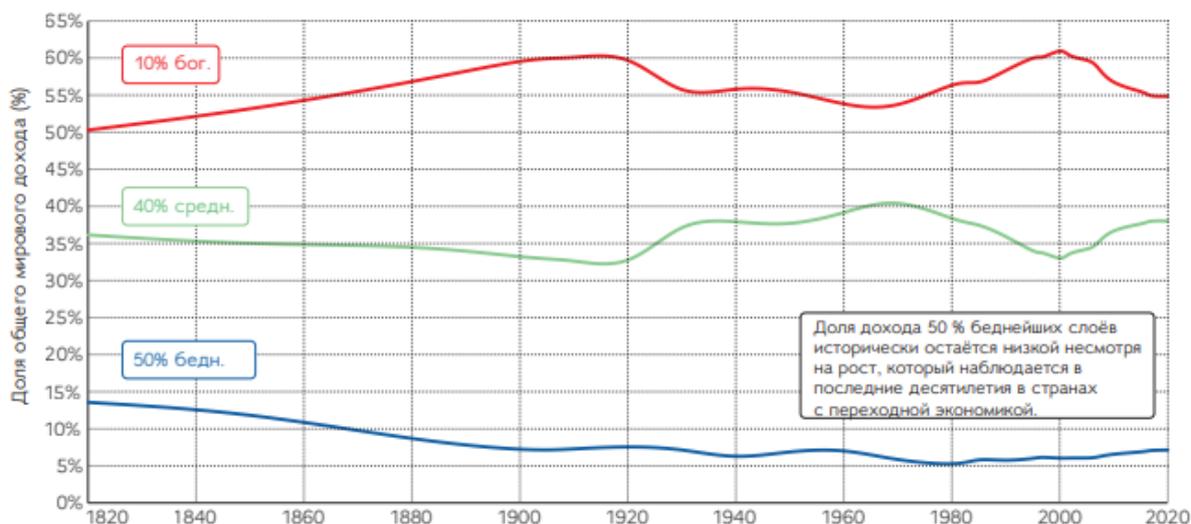


Рис. 1. Глобальное неравенство в уровнях дохода, 1820–2020 гг.

В результате мировая экономика функционирует в интересах высшего класса, для других классов обеспечиваются лишь минимально приемлемые условия жизни. Такая ситуация в разделении доходов принимается за основу в различных классических концепциях управления [3–5].

## СИСТЕМА ОТНОШЕНИЙ ЭКОНОМИЧЕСКИХ АГЕНТОВ ПО ПОВОДУ РЕАЛИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЕКТОВ

Ведущим мотивом человеческого поведения в текущем материалистическом восприятии мира является возможность получения прибыли. Спектр методов достижения цели различен и ограничивается локальными законодательствами, однако сама цель – прибыль – остается неизменной.

Для того, чтобы сохранять необходимые объемы производства, выгодно создавать товары с коротким жизненным циклом, регулировать вариативность предпочтений потребителя путем реализации мероприятий маркетинговых стратегий. Управление потребительскими предпочтениями с позиции интересов ограниченных социальных групп несет риски для стратегического развития общества. Все это оказывает очень сильное влияние в том числе и на отрасль транспорта.

В транспортной сфере задействованы три стороны – государство, бизнес и потребители транспортных услуг (Рис. 2).

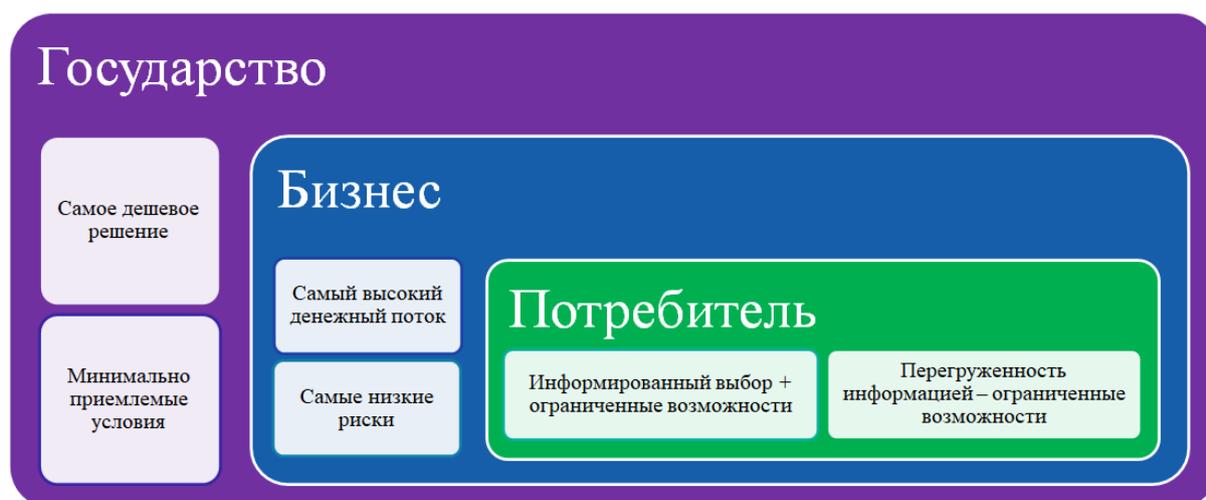


Рис. 2. Основные стороны взаимодействия транспортной отрасли

Государство в большинстве стран мира заказывает транспортные услуги у транспортных компаний для удовлетворения спроса клиентов. Спрос имеет исчисляемый объем и четкие условия предоставления услуг. Транспортные компании развивают свои услуги, чтобы сделать их более эффективными и инновационными. В реальности картина несколько иная: в большинстве случаев государство определяет для транспортных компаний минимальный набор требований, при равных критериях выбирается самое низкокзатратное решение. В свою очередь, компании-перевозчики стремятся обеспечить собственную прибыль за счет уменьшения некоторых расходов. При ограниченном сроке действия

государственных контрактов на транспортные услуги применяется практика сокращения жизненного цикла основных средств до срока действия контракта. В то же время компании ориентированы на стабильность финансовых результатов и управляют собственными рисками посредством ограничения внедрения инноваций, особенно окупаемых в долгосрочной перспективе [6, 7].

Потребители транспортных услуг во многих случаях ориентируются на информацию о продуктах и характеристиках транспорта, которую они получают извне. В условиях значительного потока информации потребители, не обладая достаточной квалификацией для ее верификации, вынуждены пользоваться предлагаемыми услугами.

Таким образом, результатом взаимодействия вышеописанных обстоятельств является следующее:

- действия государства преследуют среднесрочные цели (ограниченные избирательным циклом);
- компании стремятся получить максимальную прибыль в течение срока действия государственного контракта;
- потребители имеют строго заданный выбор услуг и убеждены в преимуществах своих вариантов.

## **ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИНВЕСТИЦИЙ НА ТРАНСПОРТЕ**

Используемые методы организации общественной жизни основаны на максимизации богатства и комфорта на протяжении всей жизни индивидуума:

- расчет чистой приведенной стоимости проекта;
  - расчет стоимости жизненного цикла;
  - метод соотношения цены и качества;
  - методы, основанные на оценке значимости побочных эффектов
- (Рис. 3).

Традиционным методом оценки транспортных проектов является расчет чистой приведенной стоимости проекта (Net Present Value, NPV) и ориентирован на инвесторов. Задачей метода является сопоставление инвестиций в проект и расходов на его реализацию (в частности, на стадии эксплуатации объекта) с доходами, генерируемыми проектом. Сопоставление предполагает приведение разновременных денежных потоков к единой точке отсчета и учет временной стоимости денег – возможностей альтернативного инвестирования и платы за риск.

Другой метод – расчет стоимости жизненного цикла (Life Cycle Costing, LCC) имеет более широкое применение: он позволяет оценивать

годовые параметры реализации проекта на базе предпосылок, аналогичных методу оценки чистой приведенной стоимости проекта. Положительной стороной метода является возможность сравнения инвестиционных проектов, имеющих различную продолжительность использования основных средств.

Метод соотношения цены и качества (Value for Money, VfM) основан на понятии качества услуги, товара за заданную цену и используется в проектах государственно-частного партнерства. Метод ориентирован на оценку стоимости удовлетворения определенных потребностей в рамках заданных качественных характеристик продукции или услуг. Де-факто, в его основе лежат положения описанных ранее методов, а сам метод позволяет осуществлять конкурентный анализ различных решений в определенной области, например, в сфере организации перевозок пассажиров.



Рис. 3. Методы оценки транспортных проектов

Первые два метода имеют схожие недостатки: узкое видение потребностей клиентов. Метод соотношения цены и качества не может ответить на вопрос «должен ли проект быть реализован или нет» и не использует системный подход. Поэтому стремление компаний к стабильному получению прибыли приводит к планированию инноваций на ограниченный временной отрезок. Выбор делается в пользу тех проектов, которые можно было бы четко рассмотреть в деталях в настоящий момент.

Новейшие методы основаны на оценке значимости косвенных эффектов – социальных, экологических, а также эффектов для связанных отраслей экономики. Эти методы не являются общепринятыми и предназначены для особых ситуаций в особых условиях. Например, для проекта строительства линии транспорта могут приниматься во внимание эффекты от развития территорий, от расширения производства у поставщиков, даже от роста стоимости недвижимости в районе строящихся станций (Рис. 4).



Рис. 4. Недостатки используемых методов оценки транспортных проектов

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ИНВЕСТИЦИЙ НА ТРАНСПОРТЕ В СОЦИАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННОЙ ЭКОНОМИКЕ

Избыточная статичность базовых предпосылок рассмотренных методов несет риск нарастания противоречий между разноуровневыми человеческими потребностями на длительном временном горизонте [8, 9].

Глобальные политические и экономические изменения вызывают необходимость выработки новых подходов для привычных сфер жизни. Интенсификация информационного обмена должна сопровождаться ускорением движения материальных потоков, а также перспективным видением развития экономики и общества [10, 11]. В связи с этим необходимо разрабатывать иные решения по оценке проектов, в том числе инновационных, которые будут учитывать объективные мировые процессы и обеспечивать гармонизацию жизни общества на длительный период.

Дополнительными критериями оценки транспортных проектов (новых видов транспорта) становятся следующие:

- участие в обеспечении значительного увеличения скорости перевозок;
- участие в создании высокой пропускной способности линий;
- обеспечение бесперебойного функционирования линий при минимальных расходах на эксплуатацию;
- скорость строительства;
- экологичность.

Комплексная модель оценки транспортных проектов базируется на учете и оценке следующих параметров:

- прямой и косвенный доход от операционной деятельности;
- доходы, которые появляются у непосредственно связанных компаний;
- наличие широкого спектра альтернативных эффектов, разделенных на три группы:

- 1) эффекты от экономии ресурсов;
- 2) экономия непроизводительных расходов;
- 3) влияние на бизнес и общество (общественное благо).

В отношении категории «общественное благо» необходимо отметить, что это спорная экономическая категория, но ее наличие не обусловлено обстоятельствами. Общественное благо больше относится к нематериальному образу мышления, в то время как общественное благосостояние – к материальному. Общественное благосостояние апеллирует к финансовой выгоде, где транспорт является одним из инструментов для извлечения прибыли. Общественные блага, напротив, – это полезные услуги, которые порождают объемный эффект, затрагивающий различные сферы социальной жизни [12]. И в данном случае транспорт как идея, прежде всего, является инструментом улучшения качества жизни широких масс (Рис. 5).



Рис. 5. Общественное благо и общественное благосостояние

В качестве примера комплексной оценки транспортных проектов приводится магнитолевитационный транспорт, который отвечает современным вызовам, стоящим перед экономикой и обществом: максимизация полезной функции транспорта; ресурсно-ориентированная эффективность [13, 14]. Технология маглев способна вернуть транспорту

свою первоначальную роль в экономике – как обслуживающего элемента. У магнитолевитационного транспорта есть возможности для удовлетворения спроса на услуги по перевозке со стороны различных групп потребителей и бизнеса. Кроме того, транспортировка посредством маглев может сделать диспропорцию между скоростью обмена информацией и скоростью транспортировки менее ощутимой (Рис. 6).

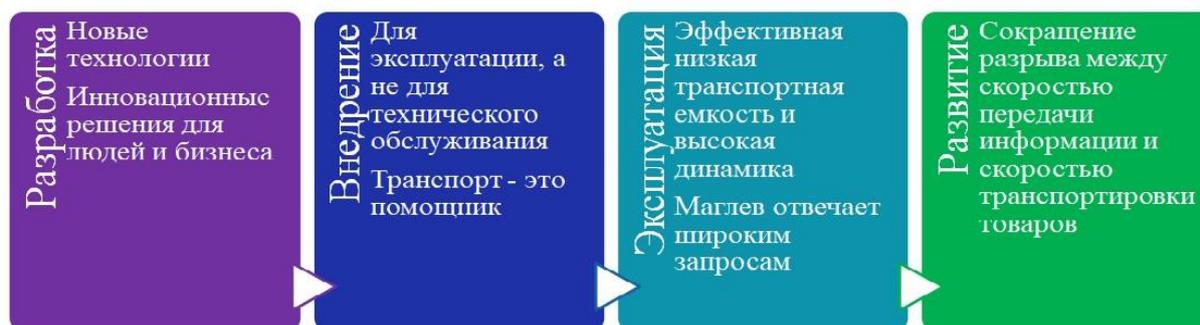


Рис. 6. Маглев как часть нового образа мышления

Оценка влияния магнитолевитационного транспорта на бизнес и общество не должна ограничиваться лишь оценкой в денежном выражении, а учитывать и другие параметры и обстоятельства:

- рост общественного блага как показателя жизненного баланса;
- инновации, которые ведут к зрелости общества и распространению общечеловеческих ценностей;
- уменьшение потребительского эгоизма и чрезмерного использования ресурсов;
- социальную справедливость в сочетании с пониманием взаимозависимости всех участников общественной жизни.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вариантов реализации национальных и многонациональных интересов в данный момент времени развития науки и техники может быть несколько. Путь, в котором выбран магнитолевитационный транспорт, может обеспечить создание эффективных сообщений, снижение транспортных расходов и улучшение транспортной доступности, расширение транспортной сети из-за более короткого срока строительства и отсутствия необходимости тратить ресурсы на интенсивное техническое обслуживание. Общее увеличение пропускной способности транспортной системы территорий оказывает значительное воздействие на социальные процессы. Смена политических и экономических векторов неизбежно

влечет формирование новых подходов общественной жизни, в том числе – применяемых для оценки проектов транспортной сферы, и выработки подробных, фундаментальных направлений науки.

### Благодарности

Исследование выполнено в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» Минобрнауки России (Постановление Правительства РФ от 13.05.2021 № 729).

#### 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. ВВП стран мира – 2022. Рейтинг и доля стран в мировом ВВП. [VVP stran mira – 2022. Rejting i dolya stran v mirovom VVP. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.03.2023. Доступно по: <https://fingeniy.com/vvp-stran-mira-2022-rejting-i-dolya-stran-v-mirovom-vvp>
2. Доклад о неравенстве в мире 2022. [Doklad o neravenstve v mire 2022. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.03.2023. Доступно по: [https://wir2022.wid.world/www-site/uploads/2021/12/Summary\\_WorldInequalityReport2022\\_Russian.pdf](https://wir2022.wid.world/www-site/uploads/2021/12/Summary_WorldInequalityReport2022_Russian.pdf)
3. Taylor FW. The Principles of Scientific Management. NY-London; 1911. [cited 2023 Mar 20]. Available from: <https://www.marketch.su/pdf/Principles-scientific-management-taylor-1911.pdf>
4. Файоль А. Общее и промышленное управление. Перевод на русский язык: Б.В. Бабина-Кореня. – М., 1923. [Fayol H. *Administration Industrielle et Générale*. Perevod na russkij yazyk: B.V. Babina-Korenya. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.03.2023. Доступно по: <https://studfile.net/preview/6132249/>
5. Мескон М., Альберт М, Хедоури Ф. Основы менеджмента (Management). – М.: Дело, 1997. – 704 с. [Meskon M, Al'bert M, Hedouri F. Osnovy menedzhmenta (Management). Moscow: Delo; 1997. 704 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 20.03.2023. Доступно по: <https://socioline.ru/pages/mmeskon-malbert-fhedouri-osnovy-menedzhmenta>
6. Акулов М.П. Пассажирский комплекс железных дорог: Монография. – СПб: НП-Принт, 2014. – 464 с. [Akulov MP. Passazhirskej kompleks zheleznyh dorog: Monografiya. St. Petersburg: NP-Print; 2014. 46 p. (In Russ.)].
7. Шнейдер М.А., Проскурякова Е.А. Рынок пригородных железнодорожных перевозок: управление и экономика: Монография. – СПб: НП-Принт, 2012. – 283 с. [Shnejder MA, Proskuryakova EA. Rynok prigorodnyh zheleznodorozhnyh perevozok: upravlenie i ekonomika: Monografiya. St. Petersburg: NP-Print; 2012. 283 p. (In Russ.)].
8. Повестка дня на XXI век. Концепция устойчивого развития и социально-политический движения [Povestka dnya na XXI vek. Konceptsiya ustojchivogo razvitiya i social'no-politicheskij dvizheniya. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.03.2023. Доступно по: <https://scfh.ru/papers/povestka-dnya-na-xxi-vek-kontsepsiya-ustoychivogo-razvitiya-i-sotsialno-politicheskij-dvizheniya/>
9. Новая реальность: Россия и глобальные вызовы [Novaya real'nost': Rossiya i global'nye vyzovy (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.03.2023. Доступно по: <http://government.ru/news/19772/>

10. Big Data: перспективы развития, тренды и объемы рынка больших данных [Big Data: perspektivy razvitiya, trendy i ob"emu rynka bol'shikh dannyh. (In Russ.)]. Доступно по: [https://delprof.ru/upload/iblock/f03/DelProf\\_Analiticheskaya-statya\\_Rynok-Big-Data.pdf](https://delprof.ru/upload/iblock/f03/DelProf_Analiticheskaya-statya_Rynok-Big-Data.pdf)  
Ссылка активна на: 10.03.2023.
11. Интернет и соцсети в начале 2023 года – главные цифры Global Digital 2023 [Internet i socseti v nachale 2023 goda – glavnye cifry Global Digital 2023. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.03.2023. Доступно по: <https://vc.ru/marketing/596126-internet-i-socseti-v-nachale-2023-goda-glavnye-cifry-global-digital-2023>
12. Самуэльсон П.А., Нордхаус В.Д. Экономика: Пер. с англ. – М.: БИНОМ, Лаборатория Базовых Знаний, 1997. – 800 с. [Samuel'son PA, Nordhaus VD. Ekonomika: Per. s angl. Moscow: BINOM, Laboratoriya Bazovyyh Znanij; 1997. 800 p. (In Russ.)].
13. Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Особенности оценки социально-экономических эффектов, возникающих в результате строительства линий грузового магнитолевитационного транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 142–156. [Smirnov SA, Smirnova OYu. 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
14. Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Оценка эффективности видов наземного транспорта для массовых грузовых перевозок // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 4. – С. 204–220. [Smirnov SA, Smirnova OYu. Evaluation of effectiveness of different transport modes for regular mass freight transportation. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(4):204-220. (In Russ., In Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst201734204-220

**Сведения об авторах:**

**Смирнов Сергей Александрович**, ведущий научный сотрудник;  
eLibrary SPIN: 3042-2910; ORCID: 0000-0002-2096-6967;  
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

**Смирнова Ольга Юрьевна**, старший научный сотрудник;  
eLibrary SPIN: 9083-2984; ORCID: 0000-0002-2239-4384;  
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

**Information about the authors:**

**Sergei A. Smirnov**, Leading Researcher;  
eLibrary 3042-2910; ORCID: 0000-0002-2096-6967;  
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

**Olga Yu. Smirnova**, Senior Researcher;  
eLibrary SPIN: 9083-2984; ORCID: 0000-0002-2239-4384;  
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

**Цитировать:**

Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Социально-экономический подход к оценке инвестиций на транспорте // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 1. – С. 135–145. doi: 10.17816/transsyst202283135-145

**To cite this article:**

Smirnov SA, Smirnova OYu. Socio-economic approach to transport investments evaluation. *Modern Transportation Systems and Technology*. 2023;9(1):135-145. doi: 10.17816/transsyst202391135-145

2023;9(1)

Электронный

оригинал-макет

подписан к публикации

30.03.2023

145 страницы Ф А4

сверстан в редакции ПГУПС

190131, Санкт-Петербург,

Московский пр., д. 9