

ISSN 2413-9203

# ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

**TRANSPORTATION  
SYSTEMS AND  
TECHNOLOGY**  
peer-review journal

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

**УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ**

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

**«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:** info@trassyst.ru  
**WEB:** www.trassyst.ru  
**Телефон:** +7 (812) 6198152; +7 (911) 2384445

Научный редактор Ю. Ф. Антонов, доктор технических наук, профессор  
Перевод на английский язык А. Ю. Гнатенко  
Выпускающий редактор Т. С. Антонова  
Редактор сайта А. В. Дитрих  
Литературный редактор Е. В. Васильева  
Верстка А. А. Стуканова

**СВИДЕТЕЛЬСТВО о регистрации средства массовой информации**

Эл№ФС77-53673 от 17.04.2013 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://trassyst.ru/> Рукопись и дополнительные материалы следует оформить в соответствии с правилами редакции, см. подробно по <https://trassyst.ru/trassyst/about/submissions>

**ПОДПИСКА**

Журнал распространяется через Интернет без ограничений и по адресно-целевой подписке через редакцию

**ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ  
И ТЕХНОЛОГИИ**

Том 5, № 4

2019

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

**Зайцев Анатолий Александрович**,  
д.э.н., профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА, НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР**

**Антонов Юрий Федорович**, д.т.н., профессор ПГУПС,  
Санкт-Петербург, Россия

**МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Богданов Александр Владимирович**, д.физ.-мат.н., профессор Санкт-Петербургского Государственного университета, Санкт-Петербург, Россия;

**Верескун Владимир Дмитриевич**, д.т.н., профессор, ректор Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия;

**Ганиев Ривнер Фазылович**, академик РАН, д.т.н., профессор, Директор Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия;

**Глухих Василий Андреевич**, академик РАН, д.т.н., профессор, Научный руководитель НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия;

**Клюшпис Йоханнес**, доктор наук 2-й степени, полный профессор Деггендорфской высшей технической школы, Мюнхен, Германия;

**Колесников Владимир Иванович**, академик РАН, д.т.н., профессор, президент Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов, Россия;

**Кручинина Ирина Юрьевна**, д.т.н., ВРиО директора Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург, Россия;

**Линь Гобинь**, PhD, профессор, директор Национального транспортно-инженерного центра Маглев, доцент Университета Тунцзи, Шанхай, КНР;

**Ли Вэйли**, PhD, профессор Пекинского транспортного университета, Пекин, КНР;

**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;

**Мильников Сергей Владимирович**, к.биол.н., доцент, ученый секретарь ООО «Эко-Вектор», Санкт-Петербург, Россия;

**Никитенко Владимир Александрович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Физика» Российского университета транспорта, Москва, Россия;

**Никитин Виктор Валерьевич**, д.т.н., профессор Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия;

**Ни Фэй**, PhD, младший научный сотрудник, Национальный транспортно-инженерный центр Маглев, Университет Тунцзи, Шанхай, КНР

**Подсорин Виктор Александрович**, д.э.н., профессор Российского университета транспорта, Москва, Россия;

**Повадол Сирирангси**, Dr., Заместитель декана Факультета логистики и управления транспортом Паньяпватского института управления, Паккред, Таиланд;

**Соколова Яна Викторовна**, к.э.н., MBA, Заместитель руководителя Научно-образовательного центра инновационных пассажирских перевозок ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;

**Соломин Владимир Александрович**, д.т.н., профессор Ростовского государственного университета путей сообщения, 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;

**Терешина Наталья Петровна**, д.э.н., профессор, Заведующая кафедрой «Экономика и управление на транспорте» Российского университета транспорта, Москва, Россия;

**Титова Тамара Семёновна**, д.т.н., Первый проректор – Проректор по науке Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, 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

**"TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY"**

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:** info@trassyst.ru  
**Website:** www.trassyst.ru  
**Phone:** +7 (812) 6198152; +7 (911) 2384445

Science Editor Yu. F. Antonov, Doctor of Technical Science, Professor  
Translation into English A. Yu. Gnatenko  
The Executive Editor T. S. Antonova  
WEB- Editor A. V. Dietrichs  
Literary Editor E. V. Vasileva  
Layout Editor A. A. Stukanova

**AIMS & SCOPE**

Network electronic journal "Transportation Systems and Technology" 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://trassyst.ru/trassyst/about/submissions>)

**SUBSCRIPTION**

The Journal is distributed via Internet for free and by subscription via Editorial office

# TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY

Vol. 5, Issue 4

2019

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

**Anatoly Zaitsev**, Dr. Economics, Professor, PSTU, St. Petersburg, Russia

**DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF, THE SCIENTIFIC EDITOR**

**Yuri Antonov**, Dr.Sc., Professor PSTU, St. Petersburg, Russia

**INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD**

**Aleksandr Bogdanov**, Dr. Physics and Mathematics, Professor, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;

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

**Rivner Ganiev**, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc..., Professor, Director Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

**Vasily Glukhikh**, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc..., Professor, Scientific Adviser at JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», St. Petersburg, Russia;

**Johannes 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., Acting Director of Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia;

**Guobin Lin**, PhD, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center (NMTC), Director, Professor, Tongji University, Shanghai, China;

**Weili Li**, Ph.D., Professor, Beijing Jiaotong University, Beijing, China;

**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;

**Sergey Mylnikov**, PhD, Associate professor, Scientific secretary LCC "Eco-Vector", St. Petersburg, Russia;

**Vladimir Nikitenko**, Dr. Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Physics Russian University of Transport, Moscow, Russia;

**Viktor Nikitin**, Dr.Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia;

**Fei Ni**, PhD, Assistant Researcher, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center, Tongji University, Shanghai, China;

**Viktor 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;

**Yana Sokolova**, PhD, MBA, Deputy Head Scientific-Educational Center for Innovative Passenger Transport Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia;

**Vladimir 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;

**Natalya Tereshina**, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Economics and Transport Management Russian University of Transport, Moscow, Russia;

**Tamila Titova**, Dr.Sc., Professor, First Vice-Rector, Vice-Rector for Research at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 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.

СОДЕРЖАНИЕ		TABLE OF CONTENTS
ОБЗОРЫ		REVIEWS
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление - Транспортные и транспортно-логистические системы</p> <p><b>Давыдов А.М.</b> Мониторинг изменений состояния и тенденций развития магнитолевитационных транспортных систем</p>	5	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field –Transport and Transport &amp; Logistics Systems</p> <p style="text-align: right;"><b>Davydov A.M.</b></p> <p>Monitoring of Changes in the Condition and Tendencies of Development of Maglev Transportation Systems</p>
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление - Транспортные и транспортно-логистические системы</p> <p><b>Малахова Т.А., Кукушкина Я.В.</b> Перспективы развития мультимодальных перевозок в дальнем пассажирском сообщении</p>	16	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field - Transport and Transport &amp; Logistics Systems</p> <p style="text-align: right;"><b>Malahova T.A., Kukushkina Ia.V.</b></p> <p>Perspective of Development of Multimodal Transport in Long-Distance Passenger Traffic</p>
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление - Транспортные и транспортно-логистические системы</p> <p><b>Терентьев Ю.А., Филимонов В.В., Шавров В.Г., Коледов В.В., Фонгратовски С.В., Суслов Д.А., Ковалев К.Л., Ильясов Р.И., Полтавец В.Н., Малинецкий Г.Г., Куренков П.В., Нижельский Н.А., Фомин В.М., Наливайченко Д.Г., Богачев В.А., Соломин В.А., Камынин А.В., Дроздов Б.В., Сысоев М.А., Ясев С.Г., Самвелов А.В., Точило В.В., Моисеенко В.Л., Осипов В.М., Алфимов А.В., Бражник П.А., Богачев Т.В.</b> Текущее состояние и перспективы развития интегральной транзитной транспортной системы (ИТТС) России на базе вакуумного магнитного левитационного транспорта (ВМЛТ)</p>	25	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field –Transport and Transport &amp; Logistics Systems</p> <p style="text-align: right;"><b>Terentyev Yu., Filimonov V., Shavrov V., Koledov V., Fongratowski S., Suslov D., Kovalev K., Ilyasov R., Poltavets V., Malinetskiy G., Kurenkov P., Nizhelskiy N., Fomin V., Nalyvaichenko D., Bogachev V., Solomin V., Kamynin A., Drozdov B., Sysoev M., Yasev S., Samvelov A., Tochilo V., Moiseenko V., Osipov V., Alfimov A., Brazhnik P., Bogachev T.</b></p> <p>Current Status and Prospects for the Development of the Integrated Transit Transport System (ITTS) of Russia on the Basis of Vacuum Magnetic Levitation Transport (VMLT).</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Безопасность на транспорте</p> <p><b>Грошев Г.М., Сугоровский Ан.В., Сугоровский А.В., Кизляк О.П., Романова И.Ю., Кукушкина Я.В.</b> Комплексная систематизация и классификация диспетчерских регулировочных приемов</p>	63	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Transport Safety</p> <p style="text-align: right;"><b>Groshev G.M., Sugorovsky A.V., Sugorovsky An.V., Kizliak O.P., Romanova I.Yu., Kukushkina I.V.</b></p> <p>Modern Systematization and Classification of Dispatch Adjustment Techniques</p>

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ		ORIGINAL STUDIES
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление - Транспортные и транспортно-логистические системы</p> <p><b>Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Харитонов К.Е., Яковлев В.В., Бондарева Е.О., Меркулова М.В., Медведев Н.Е.</b></p> <p>К вопросу создания высокоскоростной транспортной магистрали в Санкт-Петербурге</p>	73	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field - Transport and Transport &amp; Logistics Systems</p> <p><b>Senkin N.A., Filimonov A.S., Kharitonov K.E., Yakovlev V.V., Bondareva E.O., Merkulova M.V., Medvedev N.E.</b></p> <p>On the Creation of a High-Speed Transport Highway in St. Petersburg</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Безопасность на транспорте</p> <p><b>Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Ромен Ю.С., Данилов А.В.</b></p> <p>Использование широкополосной сейсмической аппаратуры в задачах интеллектуального мониторинга земляного полотна железнодорожного пути</p>	96	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Transport Safety</p> <p><b>Antonovskaya G.N., Kapustian N.K., Roman Yu.S., Danilov A.V.</b></p> <p>The Broadband Seismic Equipment Application in Problems of Roadbed Railway Smart Monit</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника</p> <p><b>Антонов Ю.Ф.</b></p> <p>Устройство левитации и боковой стабилизации на базе ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения</p>	115	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering</p> <p><b>Antonov Yu.F.</b></p> <p>Levitation and Lateral Stabilization Device Based on a Second-Generation High-Temperature Superconductor</p>
<p>Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА</p> <p><b>Гулый И.М.</b></p> <p>Методология оценки экономических эффектов инвестирования в цифровые технологии на транспорте</p>	124	<p>Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS</p> <p><b>Guliy I.M.</b></p> <p>Methodology for assessing the economic effects of investing in digital technologies in transportation</p>
<p>Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА</p> <p><b>Фёдорова М.В.</b></p> <p>Обоснование необходимости строительства магнитолевитационной трассы Санкт-Петербург – Сертолово</p>	134	<p>Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS</p> <p><b>Fedorova M.V.</b></p> <p>Justification Of the need for the Construction of the Maglev Route St. Petersburg – Sertolovo</p>

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление - Транспортные и транспортно-логистические системы

УДК [UDC] 656.02

DOI 10.17816/transsyst2019545-15

© **А. М. Давыдов**

Российский университет транспорта

(Москва, Россия)

## МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Представлены результаты мониторинга изменений состояния и тенденций развития магнитолевитационных транспортных систем. Исследование проводилось на основе контекстного поиска релевантных документов в открытых глобальных библиографических и реферативных базах данных научных публикаций (Scopus, Web of Science), международных патентных базах (Google Patent, WIPO).

Получены статистические оценки скорости и интенсивности генерации новых технических и технологических решений. Эти оценки предлагается использовать в качестве инструментария для прогнозирования перспективных направлений исследований и разработки новых видов транспортных систем.

**Ключевые слова:** магнитная левитация, маглев, патентные исследования, публикационная активность, технологические ритмы.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Transport and Transport & Logistics Systems

© **A. M. Davydov**

Russian University of Transport

(Moscow, Russia)

## MONITORING OF CHANGES IN THE CONDITION AND TENDENCIES OF DEVELOPMENT OF MAGLEV TRANSPORTATION SYSTEMS

The results of monitoring of changes in development trends of maglev transportation systems are presented. The study was conducted on the basis of contextual search for relevant documents in open global abstract and citation databases of scientific publications (Scopus, Web of Science), international patent databases (Google Patent, WIPO).

Statistical estimates of the rate and intensity of generating new technical and technological solutions were obtained. These estimates are proposed to be used as a tool for forecasting promising areas of research and development of new types of transport systems.

**Keywords:** magnetic levitation, maglev, patent search, publication activity, technological rhythms.

## ВВЕДЕНИЕ

Использование явления магнитной левитации для транспортировки людей и грузов вот уже более 100 лет рассматривается как прогрессивное технико-технологическое решение для создания принципиально новых высокоэффективных ресурсоэкономных и экологически безопасных транспортных средств и транспортных систем. В настоящее время такие системы находятся на различных этапах своего жизненного цикла. Некоторые из них находятся на этапе предварительных фундаментальных и прикладных исследований, технико-экономического обоснования и разработки, другие воплощены в действующих моделях, или ведутся испытания действующих образцов, некоторые уже введены в эксплуатацию.

Особенно важно в существующих условиях, когда статус магнитолевитационных транспортных систем не вполне определен, оценить потенциал их воздействия на устойчивое развитие, влияние на технологии и стандарты рельсового транспорта (железнодорожного, монорельсового, трубновакуумного и др.), а также выявить текущие тенденции и оценить их влияние на рыночные перспективы использования новых типов транспорта.

В этом отношении, полезным инструментом решения поставленной задачи является оценка скорости генерации новых технических и технологических решений, ключевых направлений диффузии инноваций, а также прогнозирование перспективных направлений исследований и разработки будущих транспортных систем. Оценка проводится на основе анализа патентной и публикационной активности открытых глобальных библиографических и реферативных баз данных научных публикаций (Scopus, Web of Science), международных патентных баз (Google Patent, WIPO). Некоторые результаты этих исследований представлены ниже.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РИТМЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНЫХ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

На момент написания статьи (29 января 2019 г.) в патентной базе Google Patents по ключу поиска “magnetic levitation” находились 54565 патентных записей с 1911 г. и по настоящее время. TOP 1000 результатов по дате подачи заявки (наиболее ранние патенты) представлены на рис.1.

Динамика патентования изобретений в области магнитной левитации имеет явно выраженные закономерности волнообразного роста и спада активности, которые в терминологии Кузнецца (Kuznets S.), можно интерпретировать как проявление «технологических ритмов» [1].

Эти закономерности имеют место для различных временных интервалов (от 12 лет и больше).

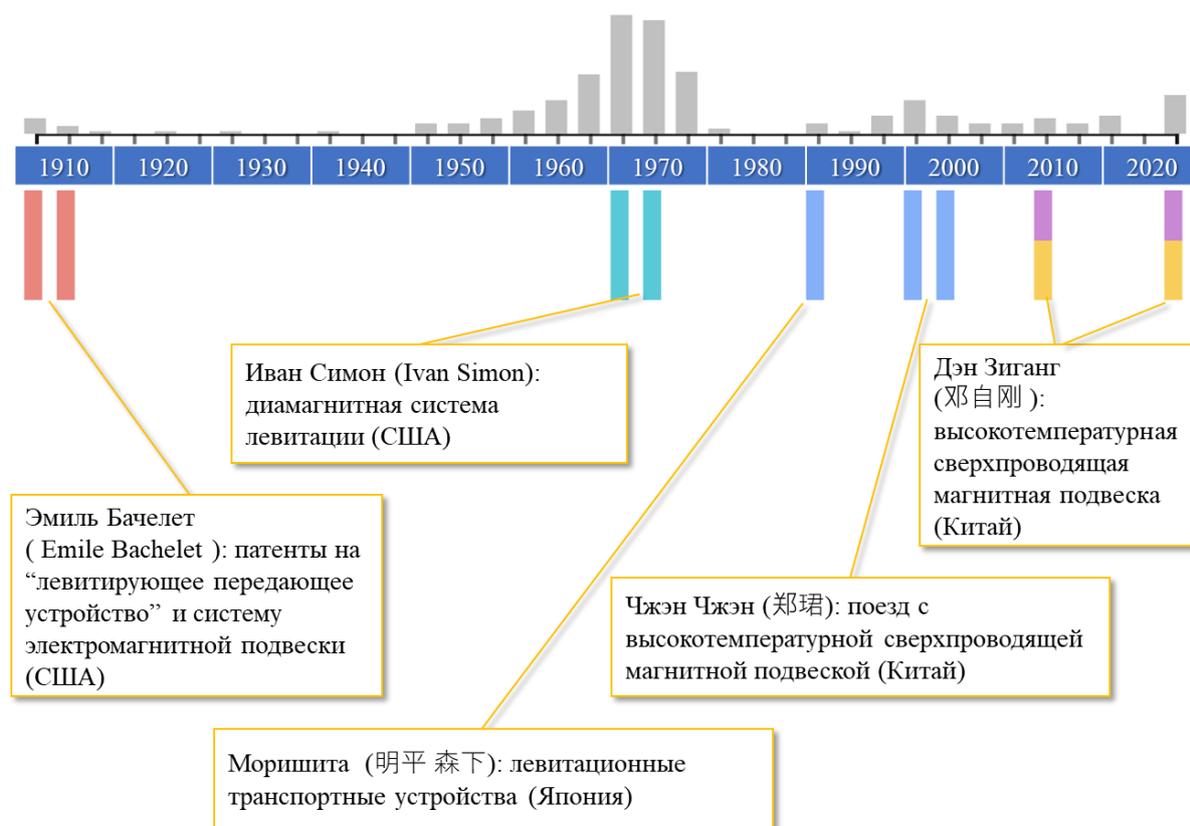


Рис. 1. TOP 1000 результатов по дате подачи заявки (наиболее ранние патенты) по ключу поиска “magnetic levitation”

Максимумы патентной активности, как правило, коррелируют во времени с началом очередного нового “технологического прорыва”. В рассматриваемом временном интервале это: создание левитирующих передающих устройств и системы электромагнитной подвески, разработка диамагнитной системы левитации, применение магнитного подвеса для нового типа пассажирских поездов; использование для этих целей высокотемпературной сверхпроводимости и т.п.

Частота максимумов патентной активности растет (в среднем удваивается за каждый период), что соответствует общей тенденции ускорения научно-технического прогресса. Тренды последних лет позволяют ожидать рост патентования изобретений в области магнитной левитации в ближайшие два-три года.

Анализ основных тематических областей патентования показывает, что основная часть патентов на изобретения (21,4 %) касается конструкций магнитной подвески для транспортных средств рельсового типа (индекс подкласса патентов В60L – далее при упоминании подклассов используется аббревиатура кодов совместной патентной классификации европейского и американского патентных ведомств: СРС).

Приоритетным направлением изобретательской деятельности являются также конструкции и способы применения подшипников, работающих на принципе магнитной левитации (СРС – F16C, 13,6 %). В ТОП 5 тематических областей (8 % и выше от общего числа патентов) входят:

- Системы железных дорог; оборудование для них (СРС – В61В);
- Электрические машины (СРС – H02К);
- Конструкции верхнего строения пути (СРС – E01В).

В целом, в подклассе В60L – “Электрооборудование транспортных средств с электротягой” наибольшую патентную активность среди стран мира демонстрируют США, Китай, Корея и Германия.

На более глубоком уровне систематизации патентов подкласса В60L в основной группе В60L 13/00 – «Системы электротяги для монорельсовых и подвесных транспортных средств или железных дорог с зубчатыми рельсами; магнитные подвески или левитационные устройства для транспортных средств», анализ патентной базы показывает следующие результаты (Рис. 2).

Начало заметной патентной активности в области создания транспортных систем с магнитной подвеской приходится на 1971-1974 гг. В этот период создаются первые системы Маглев: М-Bahn в Берлине, экспериментальный тестовый участок эстакады в Армении (бывшая республика СССР) и др. В дальнейшем изменения активности носят волнообразный характер с периодом циклов 18 лет.

Пики роста патентной активности в разные годы коррелируют во времени с достижениями науки и созданием благодаря этому новых революционных технологий (полупроводниковая электроника, сверхпроводящие материалы, использование возобновляемых источников электроэнергии, современные цифровые технологии и т.п.).

В 2016-2019 гг. наблюдается значительный рост патентной активности (более чем в два раза по сравнению с периодом 2013-2016 гг.). Это происходит, в основном, благодаря регистрации изобретений национальными патентными ведомствами Китая, Южной Кореи, России и США, а также Всемирной организацией интеллектуальной собственности (WO).



К числу областей изобретательской деятельности также относятся (в порядке убывания числа патентов):

- климатические технологии изменения климата, связанные с транспортировкой;
- поддерживающие или левитационные устройства с использованием магнитного притяжения или отталкивания;
- конструктивное выполнение электрических машин с целью управления ими;
- различные вращающиеся конструктивные элементы магнитной подвески, не являющиеся элементами передач;
- конструкции рам и тележки ходовой части и др.

Патентная активность в области использования эффектов сверхпроводимости для магнитной подвески нарастала, однако в последние годы идет на убыль: 2016 г. – 13, 2017 г. – 7, 2018 г. – 1.

ТОР правообладателей патентов в рассматриваемой сфере: Корея (Корейский научно-исследовательский институт железных дорог, Самсунг Электроникс Ко.); Япония (Хитачи, Ltd.); Китай (Юго-западный университет Цзяотун); Германия (Фесто).

В период 1986–2007 гг. наибольшее число объектов интеллектуальной собственности в сфере магнитолевитационных технологий имела Япония (Институт Интегрированных Технологий Железных Дорог и Токийская железнодорожная компания), однако с 2004 г. абсолютное лидерство захватили китайские университеты и железнодорожные исследовательские институты. В настоящее время наибольшую долю объектов интеллектуальной собственности в этой области имеют китайские университеты и научные институты (11,7 %). Второе место занимают японские научные институты и железнодорожные компании (6,4 %). Рост патентной активности упомянутых стран стимулирует разработка и реализация крупных инфраструктурных проектов транспортных систем маглев. По данным Международного совета Maglev, в настоящее время 11 проектов находятся в работе, 2 проекта остановлены, у 8 проектов статус пока не определен [2].

## **НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ МАГЛЕВ: ДИНАМИКА И ТЕМАТИЧЕСКИЕ ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В целом, несмотря на условный характер различий между фундаментальными и прикладными исследованиями в области магнитной левитации, на основе анализа реферативных баз данных Web of Science, можно сделать вывод о существенной роли в цепочке R&D, помимо инженерных наук, прикладной физики и физики твердого тела. Это

свидетельствует о высокой наукоемкости соответствующих прикладных разработок.

Статистика тем публикаций свидетельствует, что основным направлением практического применения магнитолевитационных технологий было и остается транспортировка людей и грузов.

На Рис. 3 представлена динамика публикационной активности по вопросам магнитной левитации, которая демонстрирует устойчивый рост числа научных публикаций (использованы результаты статистической обработки базы данных Scopus). Рекордный прирост числа публикаций (около 150 за год) наблюдается в 2018 г.

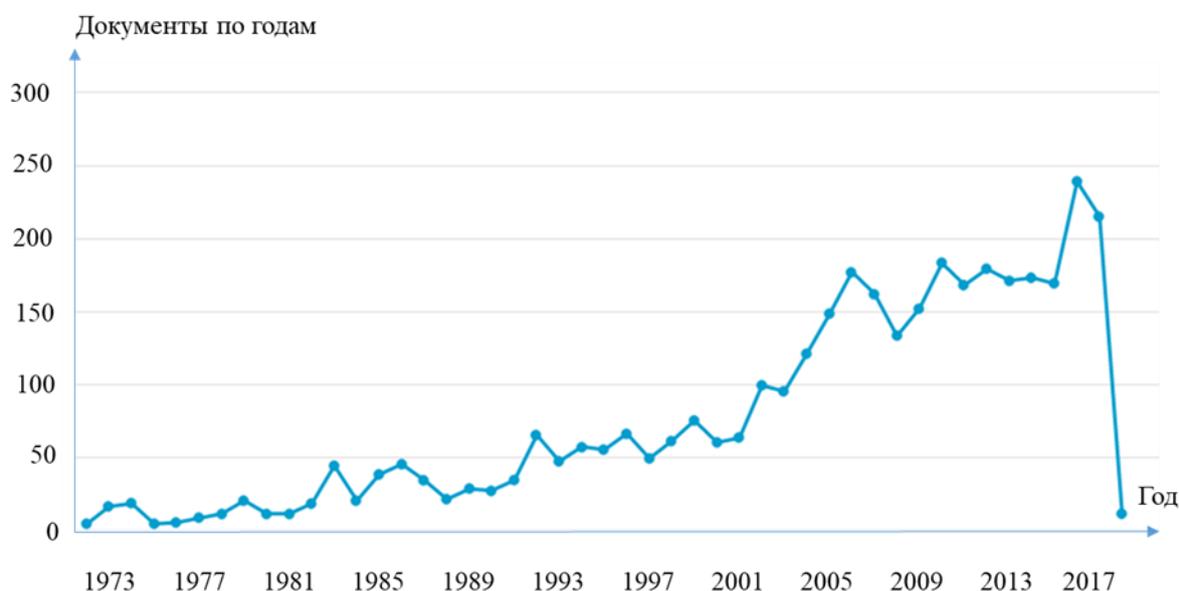


Рис.3. Динамика публикационной активности по вопросам магнитной левитации (использованы результаты статистической обработки базы данных Scopus).

По данным Scopus, наибольшее число публикаций в последние годы демонстрируют издания IEEE - Института инженеров электротехники и электроники (США). При этом, абсолютным лидером по числу научных публикаций является Китай - 1360, что превышает суммарные показатели США, Японии, Северной Кореи и Германии вместе взятых.

Что касается типа публикаций в тематической области маглев, то число научных статей оказывается сопоставимым с опубликованными тезисами докладов научных конференций. В этом отношении, можно особо отметить существенный вклад в развитие исследований научных конференций, проводимых под эгидой Международного совета по магнитной левитации (International Maglev Board (IMB) [3].

Имеет место очевидная корреляция между публикационной активностью и патентной активностью ведущих научных центров. В настоящее время лидерами по числу публикаций в сфере развития

магнитолевитационных технологий среди ведущих исследовательских центров являются университеты Китая, а также японская корпорация Интегрированных технологий железных дорог (UR).

## ПРИОРИТЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ЗАДАЧИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ МАГЛЕВ

До 30 % патентов в области технологий маглев имеют новации, позволяющие получить эффекты снижения расходов на техническое обслуживание подвижного состава, 15 % - снижения инвестиционных затрат на инфраструктуру транспортных систем, 10 % - снижения негативного влияния на окружающую среду; 8 % - повышения энергоэффективности.

Исследовательские задачи по повышению экономической эффективности высокоскоростных магнитолевитационных транспортных систем оцениваются экспертами как наиболее важные [4], в то же время, число публикаций на эту тему незначительно (за исключением вопросов энергоэффективности – 7 %). Половина всех публикаций так или иначе затрагивает вопросы дизайна и эстетики поездов (51 %) и путевой инфраструктуры (9 %).

Далее приводятся данные патентных исследований и анализа научных публикаций по отдельным прикладным направлениям использования маглев.

**Высокоскоростные транспортные системы с магнитным подвесом (Maglev train).** Ключевые правообладатели патентов в этой сфере: Юго-западный университет Цзяотун (Китай), Национальный оборонный научно-технический университет Народно-освободительной армии (Китай), Китайская Железнодорожная Четвертая Группа Инженерно-Исследовательских Институтов (Ltd), Пекинская Компания по Развитию Технологий Магнитной Подвески (Ltd), Корейский научно-исследовательский институт железных дорог.

Число публикаций и патентов в последние 5 лет имеет тенденцию к существенному росту, в основном за счет исследователей Китая, США, Кореи и Германии. Основные тематические области исследований: инженерия – 53,2 %; цифровое моделирование – 7,9 %; физика и химия материалов – 7,8 %; социальные науки – 7,6 %; математические модели – 4%; энергетика – 2,3 %.

По числу публикаций самые активные: Национальный университет оборонных технологий (Китай), Университет Цзяотун (Китай), Университет Тундзи (Китай), Исследовательский институт железнодорожной техники (Япония).

**Трубно-вакуумный транспорт на основе технологий маглев (ET3).** Период закрепления прав интеллектуальной собственности на магнитолевитационную технологию транспортировки ET3 приходится на 1995-1998 гг., далее спад, и только после 2013 г. активность вновь возрождается высокими темпами. Ключевые правообладатели патентов в этой сфере: Дэрил Остер (США), Чжан Вэньсян (Китай), компания Et3.Com.Inc., Даляньский университет Цзяотун (Китай).

Публикационная активность по отраслям знаний характеризуется значительной долей публикаций социальной направленности и различных аспектов физики процессов транспортировки по вакуумной трубе (соответственно 14,4 % и 13 %). По числу публикаций самые активные: Университет Цзяотун (Китай), ET3.COM.INC. (международный альянс), Пекинский университет.

**Трубно-вакуумный транспорт на основе технологий Hyperloop.** Резкий всплеск патентной и публикационной активности проекта Hyperloop начинается в 2006 г. и продолжается в настоящее время.

Ключевые правообладатели патентов в этой сфере: компании Hyperloop Technologies, Inc., Ford Global Technologies, Llc, Amazon Technologies, Inc, Hyperloop Transportation Technologies, Inc., а также Корейский институт строительных технологий.

Характерной особенностью публикаций по отраслям знаний является большая их доля в сфере инженерии – 47,8 % и бизнеса – 10 %. Наибольшее число авторов публикаций из Америки, Англии, Канады и Северной Кореи.

По числу публикаций самые активные научные центры: Университет Пердью (США), Технологический университет в Делфте (Нидерланды), Массачусетский технологический институт (США), Исследовательский центр НАСА Гленн.

**Городской транспорт на основе технологий Maglev (Urban Maglev – Monorail, SkyTran System).** Патентная и публикационная активность в этом направлении с 2000-х годов демонстрирует стабильный рост, что, видимо, имеет связь с реализацией ряда проектов монорельсовых дорог в странах Азии и Америки.

Ключевые правообладатели патентов в этой сфере: Корейский научно-исследовательский институт железных дорог, Китайская Железнодорожная Четвертая Группа Инженерно-Исследовательских Институтов, Ltd, Юго-западный университет Цзяотун (Китай), Национальный оборонный научно-технический университет (Китай), Пекинский университет Цзяотун.

Характерной особенностью публикаций по отраслям знаний является большая их доля в сфере инженерии – 57,9 % и в сфере социальных наук –

10,5 %. Наибольшее число авторов публикаций из Америки, Китая, Северной Кореи и Гонг Конга.

По числу публикаций самые активные научные центры: Министерство образования Китая, Пусанский национальный университет (Корея), Корейский научный электротехнологический институт.

**Лифты на основе магнитолевитационных технологий (Maglev Elevator).** Максимум патентной и публикационной активности приходится на 2013-2016 гг. Ключевым правообладателем патентов в области магнитолевитационных лифтов являются японские корпорации Мицубиши, Хитачи, Тошиба, а также финская корпорация KONE.

Характерной особенностью публикаций по отраслям знаний является значительная доля (55,6 %) статей в сфере инженерии и компьютерного моделирования устройств и процессов (7,9 %). Наибольшее число авторов публикаций из Китая, США и Германии.

По числу публикаций самые активные организации: Шеньянский технологический университет (Китай) и Рейнско-Вестфальский технический университет Ахена (Германия).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье результаты анализа патентной и публикационной активности в области исследований и разработок магнитолевитационных транспортных систем, могут быть рекомендованы для использования в качестве инструмента оценки скорости генерации новых технических и технологических решений, определения ключевых направлений диффузии инноваций, анализа рынка, а также прогнозирования перспективных направлений исследований и разработки будущих транспортных систем.

## БЛАГОДАРНОСТИ

При подготовке статьи автором использованы результаты патентных исследований проведенных в ходе выполнения в Российском университете транспорта научно-исследовательской работы по теме «Предварительное исследование новых типов транспортных систем рельсового типа и их влияния на устойчивое развитие, технологии и стандарты железнодорожного транспорта (NEWTRANSYS)».

Работа выполнялась по заказу Азиатско-Тихоокеанской региональной ассамблеи Международного союза железных дорог (UIC Asia-Pacific Regional Assembly).

**Автор заявляет, что:**

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

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES**

1. Kuznets S. Secular Movements in Production and Prices. Their Nature and their Bearing upon Cyclical Fluctuations. Boston: Houghton Mifflin, 1930.
2. Maglevboard – The International Maglev Board [cited 17.01.2019]. Available from: <https://www.maglevboard.net/en/>
3. Maglevboard – Конференции [cited 17.01.2019]. Available from: <https://www.maglevboard.net/ru/conferences>
4. Maglevboard – Wenk M, Klühspies J, Blow L, Kircher R, et al. Maglev: Science Experiment or the Future of Transport? Practical Investigation of Future Perspectives and Limitations of Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail [cited 30.01.2019]. Available from: <https://www.maglevboard.net/ru/forschung-ru>

**Сведения об авторе:**

Давыдов Алексей Михайлович, кандидат технических наук, доцент;  
адрес 117556, Москва, Болотниковская ул., д.5/3;  
eLibrary SPIN: 7942-6055; ORCID: 0000-0002-6263-846X;  
E-mail: letterdam@mail.ru

**Information about the author:**

Davydov Alexey Mikhailovich, candidate of technical Sciences, associate Professor;  
address 117556, Moscow, Bolotnikovskaya str., 5/3;  
eLibrary SPIN: 7942-6055; ORCID: 0000-0002-6263-846X;  
E-mail: letterdam@mail.ru

**Цитировать:**

Давыдов А.М. Мониторинг изменений состояния и тенденций развития магнитолевитационных транспортных систем. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 5–15. doi: 10.17816/transsyst2019545-15

**To cite this article:**

Davydov AM. Monitoring of Changes in the Condition and Tendencies of Development of Maglev Transportation Systems. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):5-15. doi: 10.17816/transsyst2019545-15

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление - Транспортные и транспортно-логистические системы

УДК [UDC] 656.224.072

DOI 10.17816/transsyst20195416-24

© **Т. А. Малахова, Я. В. Кукушкина**

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК В ДАЛЬНЕМ ПАССАЖИРСКОМ СООБЩЕНИИ**

Мультимодальные перевозки позволяют не только повысить интенсивность использования транспортных средств, но и сократить время поездки пассажира. Основная задача организации мультимодальных перевозок - максимально удовлетворить спрос населения на транспортные услуги при наиболее эффективном использовании подвижного состава. Проблема сокращения количества прямых маршрутов может быть решена либо путем увеличения числа беспересадочных вагонов, либо путем перехода на мультимодальные перевозки с условием согласования времени пересадки. В статье подробно описываются особенности и перспективы развития организации мультимодальных перевозок пассажиров.

**Ключевые слова:** мультимодальные перевозки, организация пассажирских перевозок, показатели пассажирских перевозок, ожидаемый пассажиропоток, уровень удовлетворенности, клиенто-ориентированный подход.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Transport and Transport & Logistics Systems

© **T. A. Malakhova, Ia. V. Kukushkina**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

(St. Petersburg, Russia)

## **PERSPECTIVE OF DEVELOPMENT OF MULTIMODAL TRANSPORT IN LONG-DISTANCE PASSENGER TRAFFIC**

Multimodal transportation will not only increase the intensity of use of vehicles, but also reduce the passenger's travel time. The main task of organizing multimodal transportation is to maximally satisfy the demand of the population for transport services with the most efficient use of rolling stock. The problem of reducing the number of direct routes can be solved either by developing direct connections, or by switching to multimodal transportation with the condition of coordinating the time of transfer. The paper describes in detail the development of multimodal passengers' transportation organization.

**Keywords:** multimodal transportation, organization of passenger traffic, passenger transportation indicators, expected passenger flow, satisfaction rate, customer-oriented approaches.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день железнодорожный транспорт является лидером по безопасности и экологичности. Но рынок транспортных услуг определяется еще и другими параметрами: скоростью, стоимостью, гибкостью обслуживания и способностью к мультимодальности. Именно в этих сферах ОАО «РЖД» необходимо ставить принципиальные стратегические задачи по достижению лидерства.

Ограниченный рынок пассажирских перевозок приводит к усилению конкурентной борьбы между видами транспорта на отдельных маршрутах, что стимулирует перевозчиков к разработке и развитию новых направлений бизнеса и транспортных услуг [1, 2]. Программой инновационного развития ОАО «РЖД» рекомендовано обратить внимание на приоритетность следующих направлений, являющихся мировыми трендами развития железнодорожного транспорта:

- скоростное и высокоскоростное движение;
- экология и энергоэффективность;
- мультимодальность и бесшовность.

Мультимодальные перевозки выступают одним из главных условий создания эффективных городских транспортных систем в агломерациях, поскольку способствуют рациональному распределению пассажиропотоков по видам транспорта [3].

## ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ДАЛЬНИХ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

Росту пассажирооборота в дальнем железнодорожном сообщении в последние годы наряду с благоприятными условиями внешней среды способствовали применение комплекса маркетинговых инструментов, повышение скоростей, комфорта и качества перевозок, развитие сервисов и эффективного взаимодействия с органами власти. В АО «ФПК» разработана система повышения качества обслуживания на всем протяжении клиентского пути. При неценовой конкуренции, в отличие от ценовой, стоимость транспортных услуг остается прежней, а продвижение услуг осуществляется за счет расширения ассортимента и свойств услуг, а также их высокого качества [4].

Для удобства транспортного обслуживания населения важна возможность беспересадочного проезда пассажиров между станциями отправления и назначения. При разработке маршрутной сети пассажирских сообщений соблюдение требований по беспересадочной перевозке наиболее мощных по объему корреспонденций пассажиропотоков является одним из ключевых. Для этих же целей могут быть использованы

мультимодальные пассажирские перевозки – достаточно новая для России форма взаимодействия операторов различных видов транспорта с потребителями.

Как форму выполнения этой функции можно использовать организацию локальных транспортных систем как совокупности транспортных средств, используемых путей сообщения, различных перевозчиков, объединяемых и координируемых одним мультимодальным оператором с целью выполнения перевозок пассажиров с заданными количественными и качественными показателями [5].

Основное отличие локальной транспортной системы от глобальной транспортной системы заключается в том, что локальная транспортная система организуется и функционирует для выполнения конкретной пассажирской перевозки в интересах отдельного мультимодального оператора.

Достаточно долгое время при построении маршрутной схемы обращения пассажирских поездов не учитывались потребности пассажиров в удобных и качественных стыковках и пересадках по узловым станциям между поездами пересекающихся маршрутов. Частично данную проблему решало курсирование вагонов беспересадочного сообщения, обеспечивающих не пересадку пассажиров, а перецепку вагона между стыковочными поездами [6]. Такая система связана с дополнительной работой по станциям перецепки вагонов, удобством пассажира и увеличением времени в пути, но она обеспечивала возможность покупки сквозного билета от станции отправления до станции назначения по более дешёвому тарифу, что исключено при покупке двух отдельных билетов при пересадке пассажира [7].

Основными критериями организации мультимодальной перевозки являются:

- конкурентные преимущества относительно автотранспорта (тариф);
- пассажироемкость направления – наличие устойчивого пассажиропотока между населенными пунктами, с которых организуется подвоз автотранспорта к поездам дальнего следования;
- организация согласованного по времени подвоза автотранспорта к станциям пересадки на поезда дальнего следования;
- возможность организации продажи проездных документов на различные виды транспорта в одной кассе.

Принятие решения о запуске мультимодальных перевозок было обусловлено необходимостью снижения издержек на выполнение перевозок на малоэффективных маршрутах и сохранения транспортной мобильности населения. Мультимодальные перевозки затронули как раз те маршруты, где были отменены либо поезда, либо прицепные вагоны

АО «ФПК» осуществляет мультимодальные перевозки с декабря 2014 года. Данными перевозками воспользовались более 250 тысяч человек.

В настоящее время АО «ФПК» выполняет перевозки на мультимодальных маршрутах, базируясь на следующих принципах:

- замена неэффективных железнодорожных маршрутов автобусным сообщением;
- продление маршрутов по принципу «последняя миля» на направлениях;
- организация фидерных перевозок (подвоз пассажиров к дневным поездам).

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК**

Для повышения эффективности действующих мультимодальных маршрутов и поиска новых направлений мультимодальных перевозок в Компании в 2018 году запущен стратегический проект «Мультимодальные перевозки». Компания получает дополнительный доход за счет продажи проездных документов в автобусы, при этом несет фиксированные затраты по договору фрахтования с транспортной компанией, позволяющие при полной загрузке автобусов вывести мультимодальные перевозки на рентабельный уровень. При этом рейсы автобусов должны быть состыкованы с временем отправления и прибытия пассажирских поездов, а билеты на автобус и поезд пассажир должен иметь возможность оформить в любой кассе АО «ФПК» и на сайте ОАО «РЖД» [8, 9]. В системе «Экспресс» разработаны информационные технологии продажи сложных маршрутов, которые обеспечивают продажу мультимодальной перевозки в смешанном сообщении «поезд – автобус» как единого целого маршрута, состоящего из нескольких сегментов. Разработанный комплекс позволяет производить оформление на всей сети железных дорог РФ в билетных кассах АО «ФПК» и его субагентов мультимодальных перевозок как на весь маршрут следования, так и на отдельный его сегмент с выдачей пассажиру проездного документа на проезд железнодорожным транспортом и Талона на получение услуги «перевозка автобусом» на автобусные участки пути, включенные в мультимодальную перевозку. Для этого в системе АСУ «Экспресс» организуется ввод условного поезда. Посадка пассажиров на автобус производится по предъявлению пассажиром талона, оформленного на бланке строгой отчетности «Квитанция разных сборов» или на универсальном бланке «Контрольный купон электронной квитанции разных сборов». Размещение пассажиров в автобусе осуществляется на свободные места по указанию представителя

перевозчика. Также, в целях повышения спроса на перевозки в мультимодальном сообщении в 2015 году была реализована возможность осуществления электронной регистрации для посадки пассажиров в условный поезд (автобус) без распечатанного проездного документа.

Проблема перераспределения пассажиропотоков в пригородном и региональном междугородном сообщении с автотранспорта на железнодорожный требует детальной проработки, включающей разработку оптимального расписания движения и тарифной политики, анализ местных особенностей в каждом населенном пункте, изучение психологии пассажира. Однако по оценкам исследователей перераспределение пассажиропотоков с автотранспорта на железнодорожный возможно, если расстояние между остановочными пунктами находится в диапазоне от 0 до 500 м [10]. Эти данные можно использовать для обоснования размещения остановочных пунктов при осуществлении мультимодальных пассажирских перевозок.

В сегменте взаимодействия автобусного сообщения с железнодорожным транспортом существует ряд нерешённых проблем. Во многих городах России объекты внешнего пассажирского транспорта (автовокзалы, железнодорожные вокзалы и аэропорты) находятся на значительном удалении друг от друга. Тем самым создаются условия для необоснованной конкуренции и отказа пассажирами от поездок.

При недоиспользовании провозной способности определенного вида транспорта необходимо увеличивать долю его участия в логистической системе с помощью повышающих коэффициентов, выявить причины потребительской непривлекательности и принять меры к повышению конкурентоспособности. В противном случае пассажиропотоки перераспределятся в выстроенной логистической схеме вопреки разрабатываемым логистическим маршрутам, поскольку пассажиры, являясь интеллектуальным «грузом», могут самостоятельно принимать решения о выборе вида транспорта. Непривлекательность вида транспорта нередко связана с неудобством расписания; его несогласованностью с графиками движения транспортных средств других перевозчиков, поэтому более гибкая логистика существенно повысит интерес клиентов к услугам думающей о них транспортной компании. При согласовании времени прибытия и отправления транспортных средств различных перевозчиков необходимо учитывать, что чем меньше общая продолжительность поездки, тем меньше должны быть и сроки нахождения пассажира в пунктах пересадки [11].

Для повышения конкурентоспособности железных дорог при осуществлении пассажирских перевозок необходимо использовать маркетинговые принципы для активации неценовых форм конкуренции и формирования устойчивых потребительских предпочтений независимо от

тарифной политики [12, 13]. Одним из важнейших элементов маркетинга является исследование рынка. Ставка на прямой контакт представителей компании-перевозчика ОАО «РЖД» с непосредственным пассажиром путем анкетирования позволяет получать все нужные данные из первых рук. Это повышает точность собранной информации и увеличивает возможности компании правильно перераспределить свои ресурсы для устранения слабых мест. Детальная оценка полученных в ходе интервьюирования данных и построенные, на основе полученных результатов профили удовлетворенности потребителя, позволяют верно оценивать конечные результаты. В итоге, эти сведения становятся важной основой для улучшения работы пассажирских компаний, дают полноценную картину необходимости внедрения корректирующих мероприятий, а также внедрения новых продуктов и услуг. Общей задачей является получение обратной связи от пассажира для принятия управленческих решений по вводу новых продуктов или услуг, а также проведения корректирующих мероприятий для улучшения качества обслуживания. В результате таких расчетов выявляются наиболее значимые и важные для пассажира факторы, при наличии которых он отдает предпочтение пригородному железнодорожному транспорту: скорость движения (время в пути), частота курсирования поездов (график движения), комфорт в пути следования [14, 15]. На основании маркетинговых исследований и технико-экономических расчетов составляется паспорт мультимодального маршрута.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перспективы развития мультимодальных пассажирских перевозок позволят железнодорожному транспорту успешно взаимодействовать с автомобильным и другими видами транспорта. Максимальный эффект от мультимодальной перевозки можно получить, лишь улучшая показатели совокупной перевозки на всем ее протяжении. При этом все звенья общей транспортной цепи должны работать как единая система.

Для занятия ниши на рынке транспортных услуг существуют два пути: разработка новых услуг и повышение качества основных и сопутствующих услуг и, как следствие, повышение уровня сервиса. Железнодорожный транспорт является основным связующим звеном в большинстве мультимодальных транспортных систем как наиболее надежный, безопасный, экологичный и обладающий большой провозной способностью, а железнодорожные вокзальные комплексы в современных условиях преобразуются в многофункциональные транспортно-пересадочные узлы, обеспечивающие удобную и минимальную по времени пересадку пассажиров.

**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. Лapidус Б.М. Оперезажущее развитие железнодорожного транспорта – выбор времени // Бюллетень объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2018. – № 5–6. – С. 1–16. [Lapidus BM. Operezhajushhee razvitie zheleznodorozhnogo transporta – vybor vremeni. *Bjulleten' obedinennogo uchenogo soveta ОАО "RZhD"*. 2018;(5-6):1-16. (In Russ.)]. Доступно по: [https://www.vniizht.ru/fileadmin/site/files/bulletin/Bulleten\\_OUS\\_2018\\_5-6.pdf](https://www.vniizht.ru/fileadmin/site/files/bulletin/Bulleten_OUS_2018_5-6.pdf). Ссылка активна на: 30.11.2019.
2. Лapidус Б.М., Мишарин А.С., Махутов Н.А. и др. О научной платформе стратегии развития железнодорожного транспорта в России до 2050 года // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2017. – № 2. – С. 1–20 [Lapidus BM, Misharin AS, Mahutov NA, et al. O nauchnoj platforme strategii razvitija zheleznodorozhnogo transporta v Rossii do 2050 goda. *Bjulleten' Obedinennogo uchenogo soveta ОАО "RZhD"*. 2017;(2):1-20 (In Russ.)]. Доступно по: [http://vniizht.ru/fileadmin/site/files/bulletin/Bulleten\\_OUS\\_2017\\_2.pdf](http://vniizht.ru/fileadmin/site/files/bulletin/Bulleten_OUS_2017_2.pdf) Ссылка активна на: 30.11.2019.
3. Вакуленко С.П., Копылова Е.В., Куликова Е.Б., Колин А.В. Мультимодальные пассажирские перевозки с участием АО «ФПК». М.: МГУПС (МИИТ), 2015. – 100 с. [Vakulenko SP, Kopylova EV, Kulikova EB, Kolin AV. *Mul'timodal'nye passazhirskie perevozki s uchastiem АО "ФПК"*. Moscow: MGUPS(МИИТ), 2015. 100 p. (In Russ.)]. Доступно по: <http://net.knigi-x.ru/24ekonomika/781617-1-institut-upravleniya-informacionnih-tehnologiy-kafedra-transportniy-biznes-vakulenko-multimodalnie-passazhirskie-pere.php>. Ссылка активна на: 30.11.2019.
4. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г.: утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-р. [Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2030 g.: utv. Rasporjazyheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 22.11.2008 g. No 1734-r (In Russ.)]. [Интернет]. Доступно по: <https://www.mintrans.ru/documents/3/1009>. Ссылка активна на: 30.11.2019.
5. Левкин Г.Г. Организация интермодальных перевозок (конспект лекций). – Берлин: Директ-Медиа, 2014. – 178 с. [Levkin GG. *Organizacija intermodal'nyh perevozok (konspekt lekcij)*. Berlin: Direkt-Media, 2014.-178 p. (In Russ.)]. Доступно по: [https://aldebaran.ru/author/levkin\\_grigoriyi/kniga\\_organizaciya\\_intermodalnyih\\_perevozok](https://aldebaran.ru/author/levkin_grigoriyi/kniga_organizaciya_intermodalnyih_perevozok) Ссылка активна на: 30.11.2019
6. Макарова Е.А., Ершиков Н.В., Малахова Т.А. Анализ развития системы организации пассажирских перевозок в вагонах беспересадочного сообщения // Бюллетень результатов научных исследований. – 2018. – № 3. – С. 49–61. [Makarova EA, Ershikov NV, Malahova TA. Analiz razvitija sistemy organizacii passazhirskih perevozok v vagonah besperesadochnogo soobshhenija. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2018;(3):49-61 (In Russ.)]. Доступно по: <http://brni.info/download/выпуск-28.pdf> Ссылка активна на: 30.11.2019.

7. Колин А.В., Роменский Д.Ю. Проблемы и перспективы развития мультимодальных пассажирских перевозок с использованием железнодорожного транспорта // Транспортный бизнес в России. – 2018. – № 8. – С. 104–107. [Kolin AV, Romenskij DYu. Some directions of improving efficiency of military – economic support of radiation, chemical and biological protection wars. *Transportnyj biznes v Rossii*. 2018;(8):104-107 (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32851366> Ссылка активна на: 30.11.2019.
8. Дейкова Н.А., Волкова Н.М. Развитие мультимодальных услуг на рынке пассажирских перевозок в дальнем следовании // Развитие экономической науки на транспорте: проблема оптимизации бизнеса: материалы V Международной научно-практической конференции – СПб: ПГУПС, 2016. – С. 114–120. [Dejkova NA, Volkova NM. Razvitie mul'timodal'nyh uslug na rynke passazhirskih perevozk v dal'nem sledovanii. “Razvitie jekonomicheskoy nauki na transporte: problema optimizacii biznesa: materialy” In Proceedings the V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii St. Petersburg: PGUPS, 2016:114-120 (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27643528> Ссылка активна на: 30.11.2019.
9. Zhuravleva NA. Digital economy as the basis of high-speed economy. *Transportation Systems and Technology*. – 2017. – Т. 3. – № 2. – С. 47–49. doi: 10.17816/transsyst20173247-49
10. Журавская М.А., Казаков А.Л., Парсюрлова П.А. О размещении остановочных пунктов при осуществлении мультимодальных пассажирских перевозок. // Транспорт Урала. – 2012. – № 4. – С. 50–53. [Zhuravskaja MA, Kazakov AL, Parsjurova PA. O razmeshhenii ostanovochnyh punktov pri osushhestvlenii mul'timodal'nyh passazhirskih perevozk. *Transport Urala*. 2012;(4):50-53 (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18294616> Ссылка активна на: 30.11.2019.
11. Вакуленко С.П., Копылова Е.В., Белянкин А.Ю. Оценка целесообразности формирования логистических систем обслуживания пассажиров // Мир транспорта. – 2015. – № 13. – С.122–128. [Vakulenko SP, Kopylova EV, Beljankin AYU. Ocenka celesoobraznosti formirovaniya logisticheskikh sistem obsluzhivaniya passazhirov. *Mir transporta*. 2015;(13):122-128 (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24107778> Ссылка активна на: 30.11.2019.
12. Makarova EA, Surzhin KV, Morozov SS, et al. Informational and analytical support of planning processes of marketing actions in high-speed trains. *Vestnik of the Railway Research Institute*. 2018;77(1):3-12. (In Russ.) doi: 10.21780/2223-9731-2018-77-1-3-12
13. Komissarov AV, Zubkova EA, Krokhalova EG, et al. New information technology of centralized management of passenger car fleet. *Vestnik of the Railway Research Institute*. 2017;76(6):323-328. (In Russ.) doi: 10.21780/2223-9731-2017-76-6-323-328
14. Bulavsky P, Belozarov V, Groshev G, et al. Estimation of time parameters of electronic document management. 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Novi Sad, 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110062
15. Шманёв Т.М., Шмарина Е.К. Оценка методом расчета индекса удовлетворенности пассажиров необходимости внедрения новых продуктов и услуг на полигоне Октябрьской железной дороги // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 1. – С. 65–71. [Shmanjov TM, Shmarina EK. Evaluation by calculating the passenger satisfaction rate for the need of implementation of new products and services at Oktyabrskaya railway. *Proceedings of*

*Petersburg Transport University*. 2015;(1):65-71 (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23206946> Ссылка активна на: 30.11.2019.

**Сведения об авторах:**

Малахова Татьяна Александровна  
eLibrary SPIN: 8206-6830; ORCID: 0000-0003-2799-0342;  
E-mail: malakhova2004@yandex.ru

Кукушкина Яна Васильевна, кандидат технических наук;  
eLibrary SPIN: 5743-1365; ORCID: 0000-0002-6530-8802;  
E-mail: kukushkina@pgups.ru

**Information about authors:**

Tatiana A. Malakhova  
eLibrary SPIN: 8206-6830; ORCID: 0000-0003-2799-0342;  
E-mail: malakhova2004@yandex.ru

Iana V. Kukushkina, Candidate of Technical Sciences;  
eLibrary SPIN: 5743-1365; ORCID: 0000-0002-6530-8802;  
E-mail: kukushkina@pgups.ru

**Цитировать:**

Малахова Т.А., Кукушкина Я.В. Перспективы развития мультимодальных перевозок в дальнем пассажирском сообщении // *Транспортные системы и технологии*. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 16–24. doi: 10.17816/transsyst20195416-24

**To cite this article:**

Malakhova TA, Kukushkina IaV. Perspective of Development of Multimodal Transport in Long-Distance Passenger Traffic. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):16-24. doi: 10.17816/transsyst20195416-24

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление - Транспортные и транспортно-логистические системы

УДК [UDC] 629.438.4

DOI 10.17816/transsyst20195425-62

© Ю. А. Терентьев<sup>1</sup>, В. В. Филимонов<sup>1</sup>, В. Г. Шавров<sup>2</sup>, В. В. Коледов<sup>2</sup>,  
С. В. Фонгратовски<sup>2</sup>, Д. А. Суслов<sup>2</sup>, Г. Г. Малинецкий<sup>3</sup>, К. Л. Ковалёв<sup>4</sup>,  
Р. И. Ильясов<sup>4</sup>, В. Н. Полтавец<sup>4</sup>, П. В. Куренков<sup>5</sup>, А. В. Камынин<sup>6</sup>,  
Б. В. Дроздов<sup>7</sup>, Н. А. Нижельский<sup>8</sup>, М. А. Сысоев<sup>8</sup>, С. Г. Ясев<sup>9</sup>,  
А. В. Самвелов<sup>9</sup>, В. В. Точило<sup>1</sup>, В. Л. Моисеенко<sup>1</sup>, В. М. Осипов<sup>1</sup>,  
А. В. Алфимов<sup>10</sup>, П. С. Бражник<sup>11</sup>, В. М. Фомин<sup>12</sup>,  
Д. Г. Наливайченко<sup>12</sup>, В. А. Богачёв<sup>13</sup>, В. А. Соломин<sup>13</sup>, Т. В. Богачёв<sup>14</sup>

<sup>1</sup> ООО «НПЦ «Криогенная энергетика»

(Санкт-Петербург, Россия)

<sup>2</sup> Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

<sup>3</sup> Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

<sup>4</sup> Московский авиационный институт

(Национальный Исследовательский Университет)

<sup>5</sup> Российский университет транспорта (МИИТ)

<sup>6</sup> АО «Спецмагнит»

<sup>7</sup> АО «Научно-исследовательский институт  
информационно-аналитических технологий»

<sup>8</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

<sup>9</sup> АО Оптико-механического конструкторского бюро «АСТРОН»

<sup>10</sup> ОАО «Московское конструкторское бюро «Компас»

<sup>11</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

(Москва, Россия)

<sup>12</sup> Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения РАН

(Новосибирск, Россия)

<sup>13</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения

<sup>14</sup> Ростовский государственный экономический университет

(Ростов-на-Дону, Россия)

## ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ТРАНЗИТНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ (ИТТС) РОССИИ НА БАЗЕ ВАКУУМНОГО МАГНИТНОГО ЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА (ВМЛТ)

**Обоснование:** Новая экономика - инновационная экономика-формирует новые вызовы и новые решения во всех сферах человеческой деятельности.

Работа поддержана РФФИ, грант 17-20-04236.

Ключевой особенностью новых экономических связей является их глобальный характер. Транспортные системы, базирующиеся на существующих технологиях, не могут обеспечить необходимый рост новых экономических связей и эффективное обеспечение действующего бизнеса.

Новые транспортные системы, базирующиеся на новых технологиях транспортировки грузов и пассажиров с соблюдением принципов энергетической и финансовой эффективности, а также экологической безопасности, создают фундамент для устойчивого развития стран и регионов, повышая в том числе качество жизни населения и человеческий потенциал.

Активно формируется экономика высоких скоростей, крайне необходимых для современных торгово-транспортных коммуникаций, а реализация любого транспортного проекта всегда тесно связана и взаимно обусловлена развитием другого проекта – энергетического и, как следствие, **проблема экономии энергии и энергосбережения становится ключевым фактором выбора наиболее эффективных базовых систем в любом транспортном комплексе!**

**Цель:** Цель данной статьи – описание динамики развития одного из альтернативных решений – Интегральной Транзитной Транспортной Системы (ИТТС) Российской Федерации на основе высокоскоростных энергосберегающих технологий Вакуумного магнитолевитационного транспорта (ВМЛТ).

**Методы:** В статье рассматриваются энергетически эффективные логистические, организационные, технические и экономические решения в области проектов высокоскоростных наземных коридоров и «энергопроводов», создаваемых на базе новейших технологий ВМЛТ. Описаны используемые экспериментальные стенды, представлены обзор практических результатов, полученных на лабораторном и производственном оборудовании, и предварительные результаты, моделирования и макетирования ВМЛТ на базе миниатюрных трасс из редкоземельных магнитов и «левитеров» на основе керамики из высокотемпературного сверхпроводника, возможности, а также перспективы и первые экспериментальные результаты отработки основных критических элементов технологии ВМЛТ. В работе описаны результаты использования современных аддитивных производственных технологий (3d-печать) для создания модели системы, микрокриогенных систем, ВТСП и РЗМ, «азотного» уровня температур для создания элементов трассы и модели системы, с возможностью масштабирования в действующую полноразмерную модель следующего поколения.

**Результаты:** Представленные результаты показывают практическую возможность дальнейшего развития и реализации данного проекта, а также его высокую конкурентоспособность по сравнению с существующими системами по экономической, производственной, энергетической и экологической эффективности.

**Ключевые слова:** вакуумный магнито-левитационный транспорт, энергосбережение, транспортные коридоры, энергопроводы, транзитный транспортный потенциал, магнитный подвес, высокотемпературная сверхпроводимость, критические технологии.

## Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Transport and Transport &amp; Logistics Systems

© Yu. A. Terentyev<sup>1</sup>, V. V. Filimonov<sup>1</sup>, V. G. Shavrov<sup>2</sup>, V. V. Koledov<sup>2</sup>,  
S. V. Fongratovski<sup>2</sup>, D. A. Suslov<sup>2</sup>, G. G. Malineckij<sup>3</sup>, K. L. Kovalyov<sup>4</sup>,  
R. I. Il'yasov<sup>4</sup>, V. N. Poltavec<sup>4</sup>, P. V. Kurenkov<sup>5</sup>, A. V. Kamynin<sup>6</sup>,  
B.V.Drozdov<sup>7</sup>, N. A. Nizhel'skij<sup>8</sup>, M. A. Sysoev<sup>8</sup>, S. G. Yasev<sup>9</sup>,  
A.V.Samvelov<sup>9</sup>, V. V. Tochilo<sup>1</sup>, V. L. Moiseenko<sup>1</sup>, V. M. Osipov<sup>1</sup>,  
A. V. Alfimov<sup>10</sup>, P. S. Brazhnik<sup>11</sup>, V. M. Fomin<sup>12</sup>, D. G. Nalivajchenko<sup>12</sup>,  
V. A. Bogachyov<sup>13</sup>, V. A. Solomin<sup>13</sup>, T. V. Bogachyov<sup>14</sup>

<sup>1</sup> LLC “Scientific and production center “Cryogenic energy”  
(St. Petersburg, Russia)

<sup>2</sup> Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS

<sup>3</sup> Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS

<sup>4</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University)

<sup>5</sup> Russian University of Transport (MIIT)

<sup>6</sup> JSC “Specmagnet”

<sup>7</sup> JSC “Research Institute of Information and Analytical Technologies”

<sup>8</sup> Bauman Moscow State Technical University (BMSTU)

<sup>9</sup> JSC Experimental design office “ASTRON”

<sup>10</sup> OJSC “Moscow Design Bureau “Compass”

<sup>11</sup> National Research Center “Kurchatov Institute”

(Moscow, Russia)

<sup>12</sup> Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, SB RAS  
(Novosibirsk, Russia)

<sup>13</sup> Rostov State Transport University (RSTU)

<sup>14</sup> Rostov State Economic University (RSEU)

(Rostov-on-Don, Russia)

## **CURRENT STATUS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE INTEGRATED TRANSIT TRANSPORT SYSTEM (ITTS) OF RUSSIA ON THE BASIS OF VACUUM MAGNETIC LEVITATION TRANSPORT (VMLT)**

New economy - an innovative economy - forms new challenges and new solutions in all spheres of human activity. A key feature of the new economic ties is their global nature.

Transport systems based on existing technologies cannot provide the necessary growth of new economic ties and the effective provision of the existing business. New transport systems based on new technologies for transporting goods and passengers in compliance with the principles of energy and financial efficiency, as well as environmental safety, create the foundation for sustainable development of countries and regions, including improving the quality of life of the population and human potential.

The rapid speed economic is been formed for nowadays commercial transportation communication. And a realization of any transport project has always tight connection and mutually conditioned with another project type – energetics. So, the problem of energy efficiency and energy supply becomes a key factor of a choice of the most energy efficiency of a base system in any transport complex!

**Aim:** The purpose of this article is to provide an alternative solution - the Integrated transit transport system (ITTS) of the Russian Federation based on the energy save technologies of Vacuum magnetic levitation transport (VMLT).

**Methods:** The article discusses organizational, technical, energy efficient, logistic and economic solutions in the field of high-speed land corridors and "energy pipelines" projects, created on the basis of the latest vacuum magnetic levitation transport (VMLT) technologies.

Experimental stands used are described, an overview of practical results obtained in laboratory and production equipment, and preliminary results of VMLT prototypings based on a miniature route of rare-earth magnets and "leviters" based on ceramics from a high-temperature superconductor, possibilities, prospects and the first experimental results of development are presented. of the main critical elements of the WMLT technology.

The paper describes the results of using modern additive manufacturing technologies (3d printing) to create a system model, microcryogenic systems, HTSC and REM "nitrogen" temperature levels to create trace elements and system models, with the ability to scale to the current full-size model of the next generation.

**Results:** The presented calculations show the practical possibility of further development and implementation of this project, as well as its very high effectiveness compared to existing systems in terms of practical application, economic, manufacturing, energy efficiency and environmental safety.

**Keywords:** vacuum magnetic levitation transport, energy saving, transport corridors, energy pipe lines, transit transport potential, magnetic suspension, high-temperature superconductivity, critical technologies.

## ВВЕДЕНИЕ

Процессы грузовых и пассажирских перевозок сегодня выходят на уровень основных составляющих экономической деятельности. Данные процессы напрямую связаны с функционированием и развитием рынков от туризма до тяжелой промышленности не только отдельных стран, но и регионов.

Переход общества на новый технологический уклад обуславливает появление соответствующей системы экономических отношений, при которых категория времени выступает одним из основных критериев эффективности не только при оценке информационных потоков, но и на традиционном рынке товаров и услуг. По существу, в настоящее время активно формируется экономика высоких скоростей, крайне необходимых для современных торгово-транспортных коммуникаций. [1], а реализация любого транспортного проекта всегда тесно связана и взаимно обусловлена развитием другого проекта – энергетического. Транспортный

и энергетический проекты составляют неразделимую технико-экономическую пару. С учетом ввода к 2020 году в России дополнительных энергетических мощностей в объеме 165 ГВт, транспорт России будет потреблять при инновационном сценарии развития 54 ГВт мощности (это больше всей ныне установленной мощности всех ГЭС России) [2].

**Таким образом, проблема экономии энергии и энергосбережения становятся ключевым фактором выбора наиболее эффективных базовых систем в любом транспортном комплексе!**

В настоящее время глобальный, а также осуществляемый, например, в рамках евразийского континента, грузооборот в большей степени обеспечивается использованием морских путей, фактически контролируемых США и Великобританией, как в части поставок энергоносителей и сырья, так и поставок конечных товаров. Россия набирает темпы развития в этой области [3]. На Севере у РФ имеется значительное географическое преимущество, подкрепленное внушительным оборонным потенциалом. Самое главное – Россия единственная страна, располагающая мощным ледокольным флотом, чтобы уверенно справляться с задачей поставки грузов из Азии в Европу (и обратно), из России в другие регионы.



Рис. 1. Северный и Южный морские пути [4]

Северный морской путь очень удобен. По нему можно с минимальными затратами перевозить грузы по маршруту Европа – Азия. И европейские компании это прекрасно понимают, но пока делают выбор в пользу политики. Между тем, Россия планирует сделать Севморпуть еще более привлекательным. Как заявили в «Госкорпорации Росатом», на это будет потрачено 7 млрд. долларов. При этом грузопоток должен составить около 72 млн. тонн грузов в год [3]. Росатом собирается стать одним из 15 крупнейших морских перевозчиков в мире. Он планирует доставлять грузы из Юго-Восточной Азии в Европу по Северному морскому пути, перехватив часть грузов с южного пути – из Азии в Европу через Тихий и Индийский океаны, Суэцкий канал, Средиземное море и Гибралтарский пролив. Грузопоток южного пути составляет примерно 1 млрд. тонн в год, в том числе 570 млн. тонн контейнерных грузов, Росатом рассчитывает на 72 млн. тонн грузов в год, в основном контейнерных – 43 млн. тонн.

Современные реалии международной политики в рамках использования и развития транспортно-логистических систем, создают угрозы как для глобальной, так и для экономик развивающихся стран, в значительной степени стран БРИКС, лишая через санкции и технологические ограничения конкурентоспособности в производственной логистике и конечных поставках.

Доставлять грузы Северным морским путем действительно намного быстрее, чем южным, но экономия в деньгах "будет частично съедаться из-за дорогих ледокольных услуг", к тому же в ледовых условиях сроки могут непредсказуемо меняться [3]. Также морские поставки даже по более короткому пути считаются уже сейчас неприемлемо долгими по сравнению с другими и возможными предлагаемыми нами альтернативными, более быстрыми и экономичными транспортными коридорами [4–10].

Современная экономика грузоперевозок строится на расчётах по транспортировке груза, эквивалентного одному стандартному двадцатифутовому контейнеру (1 TEU). Как уже отмечалось, грузопоток южного морского пути составляет примерно 1 млрд. тонн в год, в том числе 570 млн. тонн контейнерных грузов, Используя Северный морской путь, можно на 10–32 % сократить время в пути из крупнейших азиатских портов (Гонконг, Шанхай, Йокогама, Пусан, Тяньцзинь) в главные европейские гавани (Роттердам, Копенгаген, Гавр, Саутгемптон, Гамбург), и при нетрадиционных способах транспортировки [10] сократить его ещё больше и сделать СМП круглогодичным, а по экономичному и энергоэффективному сухопутному маршруту ИТТС на базе ВМЛТ товары можно доставлять за срок менее суток, при сопоставимой с Южным коридором пропускной способности, но при минимальных энергетических затратах вплоть до 14 кДж/т-км перевозимого груза.

При этом Китай, как одна из крупнейших экономик Мира, формирует диверсифицированный подход к импорту сырья и экспорту собственных товаров, – концепт нового «Шелкового пути» как для повышения экономической эффективности собственных компаний, так и для обеспечения собственной транспортно-логистической безопасности [11, 12].



Рис. 2. Схема основных транспортных потоков Экономического Пояса Шелкового Пути (ЭПШП) [9]

В рамках поставок грузов пока наиболее оптимизированным выглядит железнодорожная поставка, которая, несмотря на непомерно высокие по сравнению с морской, энергетические затраты на перевозку [6–13], потенциально, всё-таки имеет меньшие сроки поставки (до 16 дней по ЭПШП), в сравнении с Южным морским коридором, а именно это сейчас всё чаще имеет решающее значение. Но технологические пределы энергетически приемлемой скорости развития традиционного железнодорожного транспорта, по мнению экспертов, составляют не более 500–600 км/ч [14–17], что сейчас уже явно недостаточно.

Таким образом, складывается картина, в которой выгода от географического расположения России на перекрестке торговых путей между Востоком и Западом, может быть огромной, но для достижения нового уровня транспортных услуг, необходимо решить актуальную научно-техническую проблему: резкого сокращения цены, энергетических затрат и времени перевозок по суше в масштабах, по крайней мере Евразийского материка. И одними из наиболее перспективных решений в области развития высокоскоростных технологий транспортно-логистических систем представляются проекты в области не только атмосферного (АМЛТ) [14–18], но и вакуумного магнитолевитационного транспорта (ВМЛТ) [6–10, 19–25].

Как нами уже отмечалось ранее [7–10], сокращение сроков доставки грузов через, например, Панамский канал, с традиционных морских, около 30–46 суток, до примерно 15 по «подлёдному СМП», или до, примерно

менее 1 суток по коридору на базе ВМЛТ, будет привлекательно для грузоотправителей даже при возможном удорожании стоимости перевозки грузового эквивалента в 1 TEU до, например S1000 из-за ещё большей экономии на уменьшении срока обслуживания кредита, а на базе ВМЛТ можно будет, например, создать новую транспортную концепцию мощных и экономичных, так называемых «энергопроводов». Они смогут поставлять различного класса энергоносители (нефть, бензин, дизельное топливо, нефтепродукты, СПГ и пр.) со скоростями перемещения порядка 6500 км/час (1800 м/с), на расстояния тысячи и десятки тысяч километров, Рис. 3, практически без ощутимых транспортных потерь, при затратах энергии менее 0,004 кВт ч/т км, что является на сегодня наилучшим из прочих конкурентных вариантов [7, 8].

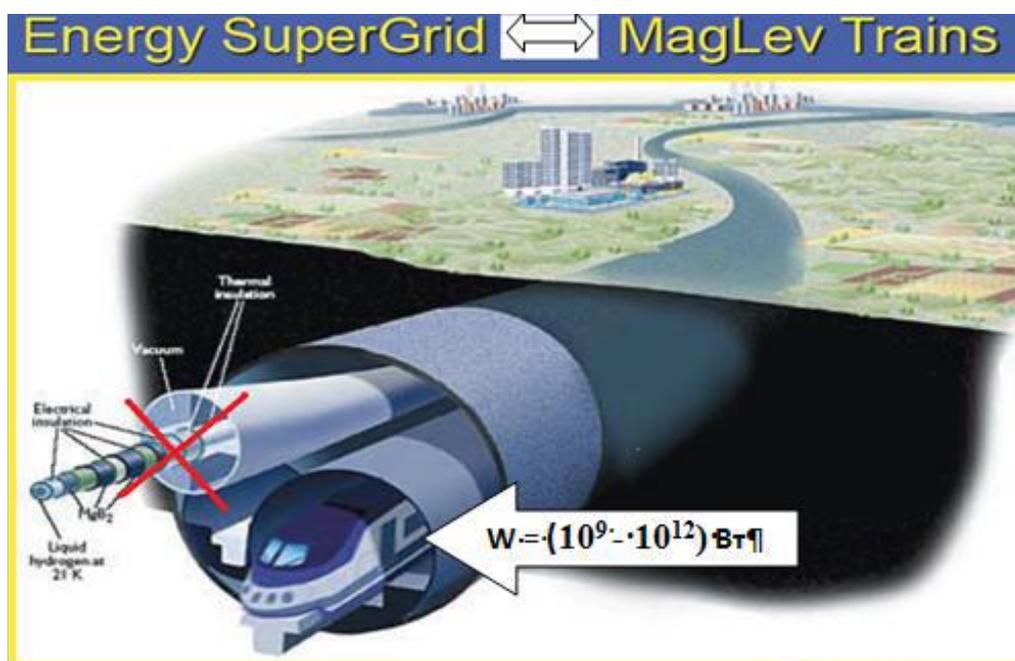


Рис. 3. Вариант концепции сверхмощного и сверхскоростного «энергопровода» гига- и тераваттного класса мощности [11]

Отдельной составляющей, влияющей на развитие и транспортной инфраструктуры и логистических систем, является развивающаяся международная интернет торговля. Сегодня до 28 % товарооборота в КНР, порядка 13 % в США, приходится на интернет торговлю, обеспеченную транспортно-логистическими сервисами [21]. Примером эффективного построения новых транспортных и логистических систем является, например, деятельность компании Amazon (США) [22], и он доказывает оправданность и эффективность развития новых технологических решений, в данном случае на основе таких же беспилотных, как и у ВМЛТ, технологий.

Исходя из этого, в ряде стран, в том числе и в России, сегодня осуществляется лабораторная отработка базовых принципов АМЛТ и ВМЛТ [7–10, 14–16, 19–30].

Так, в МАИ [26–27], были проведены необходимые обосновывающие расчётно-теоретические и экспериментальные работы, созданы методики расчёта и реальные образцы действующих моделей атмосферного магнито-левитационного транспорта – АМЛТ на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) (Рис. 4).



Рис. 4. Действующая модель АМЛТ изготовленная в МАИ.  
Магнитный ВТСП подвес грузоподъемностью 500 кг [26]

Методики, описанные в [26] были использованы нами при расчётно-экспериментальном моделировании элементов и технологий взаимодействия трассы, которая также включает бесконечно длинный ненасыщенный ( $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$ ) ферромагнитный магнитопровод, через который замыкается магнитное поле одного или нескольких ВТСП магнитов (М), расположенных на нем и разделенных друг от друга определённым расстоянием и ВТСП подвеса - левитера.

Над поверхностью М левитирует криостат с «объёмными» или «массивными» ВТСП элементами. Расчет электромагнитных полей и сил левитации и в подобных магнитных ВТСП системах, также в значительной степени определяемых их конфигурацией, сводится к решению обобщенной задачи Неймана – Дирихле, результаты которого были рассмотрены нами ранее [28].

В настоящей работе мы расскажем о планах возможного развития в ближайшем будущем данных модификаций схем ВМЛТ, где вместо постоянных магнитов в магнитных подвесах с массивными ВТСП элементами возможно использование других магнитных систем с рейстрекowymi обмотками. В этом случае описанный ранее алгоритм расчета сил левитации ПЭ в магнитном поле остается аналогичным приведенному в [28]. Изменяется только алгоритм расчета магнитных полей в системе с рейстрекowymi обмотками, так как данный вариант линейного магнитного ВТСП подвеса может быть реализован на основе использования вместо РЗМ длинных рейстрекowych катушек с ферромагнитными сердечниками.

Расчетная модель рассматриваемого магнитного ВТСП подвеса, также разработанная нашими коллегами из МАИ, представляет собой бесконечно длинный магнитопровод с расположенной на нем системой электромагнитов с рейстрекowymi обмотками. Как и ранее, будем считать, что ферромагнитное основание не насыщено и его относительная магнитная проницаемость  $\mu_{Fe} \gg 1$ . В этом случае поверхность ферромагнитного основания можно в первом приближении рассматривать как ферромагнитное зеркало, в котором отражается система рейс-трековых катушек вместе с сердечниками. Это позволяет при расчете распределений магнитных полей перейти к рассмотрению геометрии системы рейс-трековых катушек с удвоенной толщиной. Можно показать, что в силу симметрии задачи магнитные силовые линии будут ортогональны поверхности, что обеспечивает выполнение требуемых граничных условий на поверхности ферромагнитного основания:

$$H_{\tau+} = H_{\tau-}, \quad B_{n+} = B_{n-}. \quad (1)$$

В дальнейшем считается, что толщина обмотки катушки  $\varepsilon$  мала по сравнению с поперечными размерами сердечника  $L$  ( $\varepsilon \ll L$ ) и ее можно заменить токовым слоем  $I = J_{кат} \varepsilon$ , распределенным на боковой поверхности сердечника (здесь  $J_{кат}$  – средняя плотность тока в обмотке рейс-трековой катушки). Принимается также, что магнитный момент сердечника постоянен по его сечению, направлен по оси  $Y$  и определяется средним (по объему сердечника электромагнита) значением магнитного поля:

$$M_y = M = const \quad (2)$$

С учетом сделанных замечаний расчет магнитного поля от основания магнитного подвеса сводится к решению двумерной задачи Зоммерфельда для одного магнита с последующим наложением решений для заданной системы магнитов. Как будет показано ниже, в этом случае алгоритм расчета системы путевых электромагнитов может быть проведен на основе тех же алгоритмов, что и для путевых магнитов на основе РЗМ. Действительно, уравнения Максвелла для задачи магнитостатики имеют вид:

$$rot \bar{H} = J; \quad div \bar{B} = 0. \quad (3)$$

Вводя векторный потенциал магнитного поля  $\bar{A}(0, A)$  с помощью соотношения  $\bar{B} = rot \bar{A}$  и учитывая (2), уравнения (3) можно привести к уравнению Пуассона:

$$\Delta A = -\mu_0 J. \quad (4)$$

Так как в принятой постановке задачи обмотки заменены токовым слоем, то уравнение Пуассона (4) вне зоны токовых слоев сводится к уравнению Лапласа относительно  $A$ :

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = 0. \quad (5)$$

Из условия непрерывности нормальных компонент магнитной индукции  $B_n$  и разрыва касательных составляющих напряженности магнитного поля  $H_t$  следует, что на горизонтальной и боковых границах сердечников электромагнитов (СЭ) выполняются следующие граничные условия соответственно:

$$A_+ = A_-, \quad \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right)_+ = \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right)_-, \quad \text{при } (|x| \leq L \text{ и } |y| = b), \quad (6)$$

$$A_+ = A_-, \quad \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right)_+ + M + I = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right)_-, \quad (7)$$

при ( $|x|=L$  и  $|y|\leq b$ ).

Здесь индексы (+) и (-) относятся соответственно к зоне внутри СЭ и снаружи СЭ,  $b$  и  $L$  – соответственно высота и полуширина СЭ.

Из соотношений (5,6) следует, что на боковых границах СЭ (параллельных вектору  $\bar{M}$ ) функция  $A$  непрерывна, а ее нормальная производная терпит разрыв (скачок). Это позволяет перейти к решению задачи Неймана во всей плоскости  $\{x, y\}$  с заданными разрывами для  $\partial A/\partial n$  вдоль отрезков  $|y|=b$ ,  $|x|\leq l$  границы. Для построения аналитического решения задачи (7) вырежем границы  $|y|=b$ ,  $|x|\leq l$  контурами  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ . Тогда для плоскости вне этих контуров функция  $A$  будет всюду непрерывна вместе со своими производными, а на границе контуров  $|x|=L$  и  $|y|\leq b$  будут выполняться следующие граничные условия задачи:

$$\left(\frac{\partial A}{\partial n}\right)_+ - \left(\frac{\partial A}{\partial n}\right)_- = -\mu_0(M + I). \quad (7)$$

В качестве дополнительного условия задачи Неймана выбрано условие затухания поля  $\bar{H}$  на бесконечности (т.е. при  $\bar{r} = (x^2 + y^2) \rightarrow \infty$ ,  $A=0$ ). Используя функцию Грина для уравнения Лапласа, решение задачи (6)–(7) можно записать в виде:

$$A(x, y) = -\frac{\mu_0(M + I)}{4 \cdot \pi} \int_{-L}^{+L} \left\{ \ln \left[ (x-L)^2 + (y-y_0)^2 \right] - \ln \left[ (x+L)^2 + (y-y_0)^2 \right] \right\} dy_0 \quad (8)$$

Выражение (8) после несложных преобразований можно представить в следующем виде:

$$A(x, y) = -\mu_0(M + I)F(x, y), \quad (9)$$

где  $F(x, y) = \frac{1}{4\pi} [A_1(x, y) - A_2(x, y) - A_3(x, y) + A_4(x, y)]$ , а функции  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  определяются из соотношений, приведенных в [28].

Используя (9), компоненты вектора магнитной индукции  $\bar{B}(B_x, B_y)$  и напряженности магнитного поля  $\bar{H}(H_x, H_y)$  могут быть найдены из соотношений:

$$\begin{cases} B_x = \frac{\partial}{\partial y} A(x, y); \\ B_y = -\frac{\partial}{\partial x} A(x, y); \end{cases} \quad \begin{cases} H_x = \frac{1}{\mu_0} B_x; \\ H_y = \frac{1}{\mu_0} B_y - M_y. \end{cases} \quad (10, 11)$$

Расчет магнитных полей для системы из  $n$  (по оси  $x$ ) рейстрекковых катушек с сердечником проводится с использованием метода суперпозиции решений (11), сдвинутых по оси  $x$  на соответствующее расстояние с центров катушек от геометрической оси симметрии:

$$A_{\Sigma} = -\mu_0(M + I)F_{\Sigma}(x, y), \quad \text{где} \quad F_{\Sigma}(x, y) = \sum_{i=1}^n F_i(x, y).$$

В частности, для случая системы из двух и трех катушек выражения для  $A_{\Sigma}$  задаются соотношениями, также приведенными нами ранее в [28].

Для учета магнитных свойств ферромагнитных сердечников электромагнитов используется следующий приближенный подход. Магнитные свойства ферромагнитного сердечника  $B(H)$ ,  $M(H)$  аппроксимируются двумя кусочно-линейными функциями, где область  $H \leq H_{кр}$  характеризует свойства ненасыщенного ферромагнитного сердечника, область  $H > H_{кр}$  – магнитные свойства ферромагнитного сердечника, находящегося в режиме насыщения. Величина магнитного момента  $M$  сердечника, определяемого на основе уравнения:

$$\bar{B} = \mu_0(\bar{H} + \bar{M}), \quad (12)$$

рассчитывается как:

$$M = \begin{cases} M_{\hat{\delta}} \frac{H}{H_{\hat{\delta}}} & \text{и} \quad H_y \leq H_{\hat{\delta}} \\ M_{\hat{\delta}} & \text{и} \quad H_y > H_{\hat{\delta}} \end{cases}, \quad (13)$$

где  $M_{кр} = H_{кр}(\mu_{кр}^* - 1)$ ,  $\mu_{кр}^* = B_{кр} / \mu_0 H_{кр}$ .

В рамках принятых допущений величина относительной магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника  $\mu_{Fe}^* = \mu_{Fe} / \mu_0$  будет определяться из следующих соотношений:

$$\mu_{Fe}^* = \mu_{кр}^* \quad \text{при} \quad H \leq H_{кр}; \quad \mu_{Fe}^* = \frac{F \cdot (I + M_{кр}^*)}{F \cdot (I + M_{кр}^*) - M_{кр}^*} \quad \text{при} \quad H > H_{кр} \quad (14)$$

В первом приближении значение  $M$  можно определить по средней в сердечнике электромагнита величине магнитного поля. Тогда из (9)–(14) можно получить следующее общее соотношение для определения среднего по объему сердечника момента  $M$ :

$$M = \frac{I \cdot F'_{\tilde{n}\delta} \cdot (\mu_{Fe} - 1)}{\mu_{Fe} - F'_{\tilde{n}\delta} \cdot (\mu_{Fe} - 1)}, \quad (15)$$

где  $F'_{cp} = \langle F'_{\Sigma}(x, y) \rangle = \langle \partial F_{\Sigma}(x, y) / \partial x \rangle$ .

Из (15) при кусочно-линейной аппроксимации свойств материала ферромагнитопровода для ненасыщенного сердечника (при  $H \leq H_{кр}$ ) можно получить следующее значение  $M$ :

$$M = \frac{I \cdot F'_{cp} \cdot (\mu_{кр} - 1)}{\mu_{кр} - F'_{cp} \cdot (\mu_{кр} - 1)} \quad (16)$$

Для случая насыщенного сердечника (при  $H > H_{кр}$ ) из (15) с учетом (13) можно получить следующее соотношение для расчета относительной магнитной проницаемости сердечника:

$$\mu_{Fe} = \frac{F'_{cp} \cdot (I + M_{кр})}{F'_{cp} \cdot (I + M_{кр}) - M_{кр}}. \quad (17)$$

Из (15), используя соотношения для параметров ферромагнитного сердечника в критической точке перелома (при  $H = H_{кр}$ ), можно получить соответствующую этой точке величину критического тока  $I_{кр}$

$$I_{кр} = H_{кр} \left[ \mu_{Fe} - F'_{cp} (\mu_{Fe} - 1) \right] / F'_{cp}. \quad (18)$$

Соотношение (18) позволяет при заданной плотности тока в обмотках рейстрековой катушки  $J_{кат}$  и, следовательно, известной величине тока  $I$ , определить режим работы ферромагнитного сердечника магнитной системы ВТСП подвеса (при  $I \leq I_{кр}$  – ненасыщенный магнитопровод, при  $I > I_{кр}$  – магнитопровод работает в режиме насыщения). Из соотношения (15) можно определить также эквивалентный

ток  $I_{\text{экв}}$ , при котором магнитные характеристики системы ВТСП подвеса с рейс-трековыми катушками эквивалентны соответствующим параметрам магнитной системы на основе постоянных магнитов из РЗМ с магнитным моментом  $M_{\text{РЗМ}}$

$$I_{\text{экв}} = M_{\text{РЗМ}} \left[ \mu_{\text{Fe}} - F'_{\text{cp}} (\mu_{\text{Fe}} - 1) \right] / \mu_{\text{Fe}} . \quad (19)$$

Таким образом, используя соотношения (13)–(17), можно приближенно учесть степень насыщения ферромагнитного сердечника при расчете магнитных полей и сил левитации в ВТСП подвесе с рейс-трековыми обмотками возбуждения. Далее на основе полученных распределений магнитных полей проводится расчет левитационных характеристик электромагнитного ВТСП подвеса с рейс-трековыми катушками согласно алгоритму и расчетных соотношений, приведенных ранее в [28].

На Рис. 5 представлен характерный образец результата расчётов, проведенных по этой методике для реальной существующей трассы постоянными РЗМ магнитами на основе NdFeB.

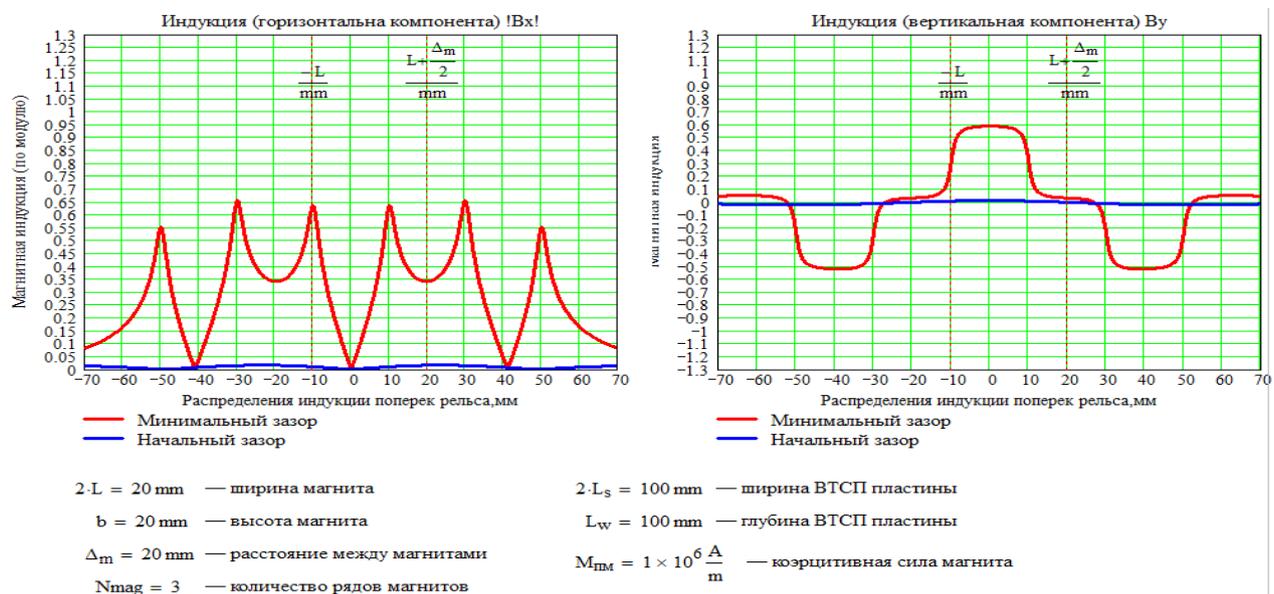


Рис. 5. Результаты расчёта конфигурации магнитного поля (в Тл по оси  $y$  и в мТл по оси  $x$ ) над рабочей поверхностью одного из макетов трассы ВМЛТ на основе постоянных магнитов на основе NdFeB

На Рис. 6 результаты расчёта следующей инновационной конфигурации схемы ВМЛТ, в которой при замене ранее рассмотренной трассы из постоянных РЗМ магнитов на основе NdFeB, на ВТСП рейс-трековые катушки открываются новые предпосылки для организации и исследования ещё более оптимального одновременного сочетания сил и вертикальной и боковой стабилизации при движении модели капсулы ВМЛТ над трассой из комбинации подложки, дистанционирующих промежутков и рейс-трековых ВТСП катушек.

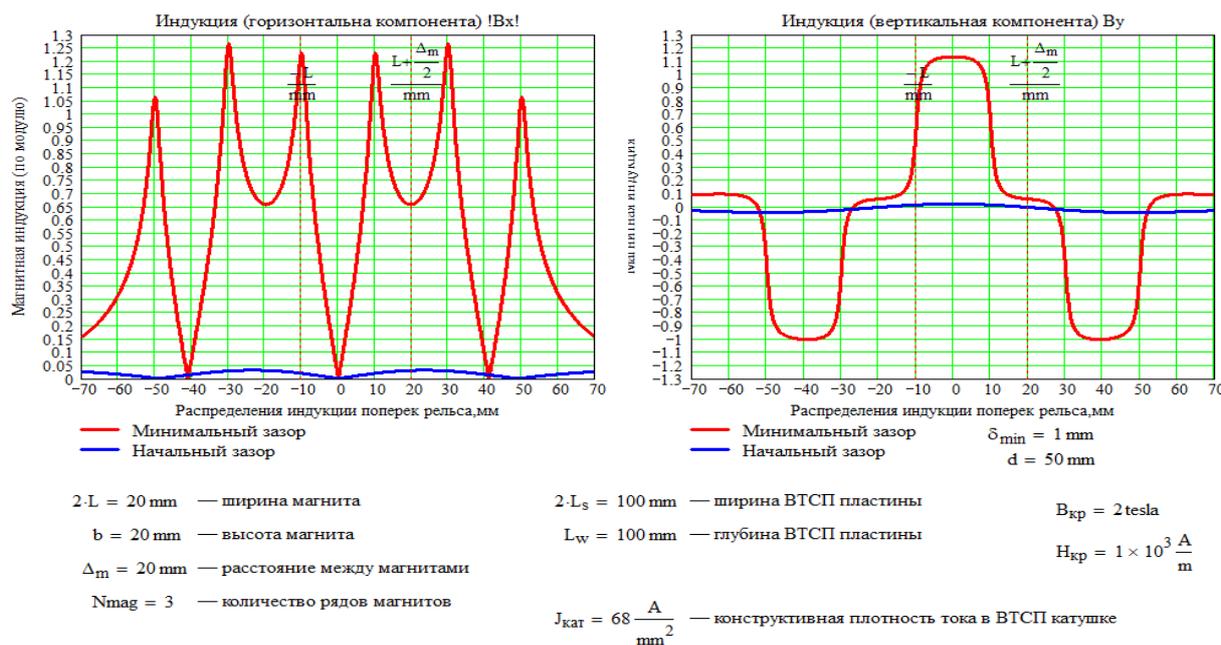


Рис. 6. Результаты расчёта конфигурации магнитного поля  
(в Тл по оси  $y$  и в мТл по оси  $x$ )  
над рабочей поверхностью одного из макетов трассы ВМЛТ

Для последующего сопоставления результатов расчёта и эксперимента, анализа, возможной адаптации и корректировки методик для применения в расчётах вакуумного МЛТ, были проведены работы по исследованию (после соответствующей адаптации и доработки), применимости ряда имеющихся измерительных стендов и методик для получения необходимых для этого экспериментальных результатов.

В частности, автоматизированная установка трёхмерной Холловской магнитометрии (Рис. 7).

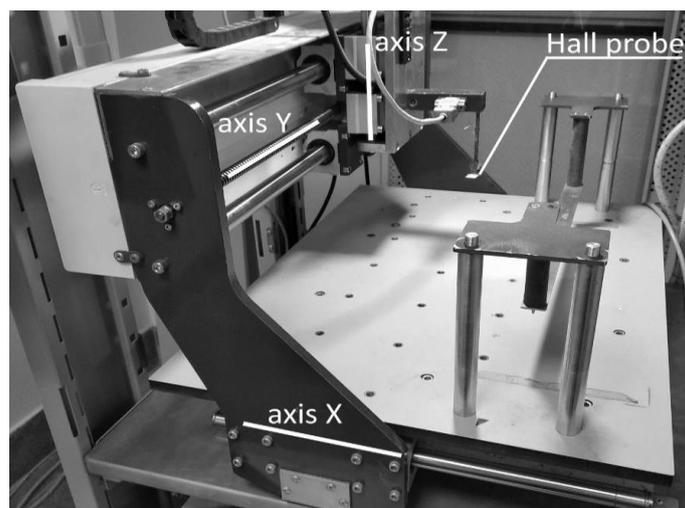


Рис. 7. Автоматизированная установка трёхмерной Холловской магнитометрии [28]

Автоматизированная установка трёхмерной Холловской магнитометрии была использована для проведения тестовых измерений топологии 3D магнитного поля рабочей и обратной сторон специально выделенного единичного фрагмента уже имеющейся магнитолевитационной трассы на постоянных магнитах NdFeB, Рис. 8a и тестового единичного магнита NdFeB на подложке, Рис. 8b, результаты которых приведены на Рис. 8, в качестве примера получаемых на установке результатов.

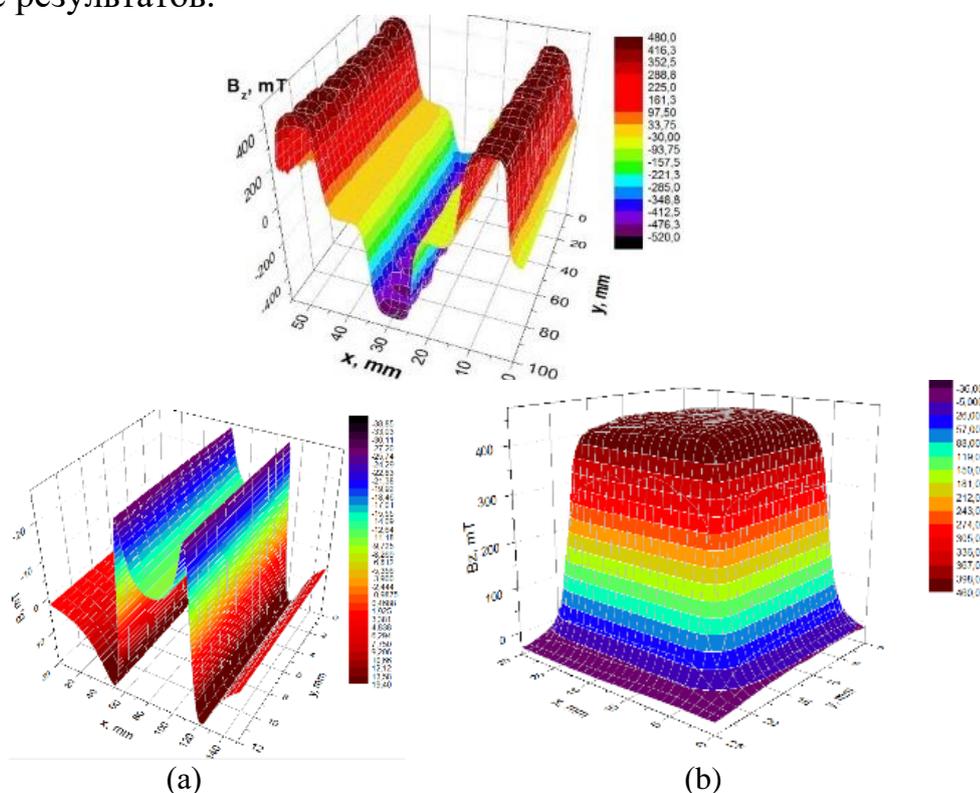


Рис. 8. Примеры результатов измерения топологии магнитного поля вариантов трассы (a) и единичного магнита (b)

Так как в наших экспериментах пока использовались не аттестованные и специально отобранные на входном контроле единичные элементы блоков ВТСП и постоянных РЗМ магнитов, а просто их коммерчески доступные аналоги, свойства которых не были подтверждены с достаточной точностью даже сертификатами, говорить о количественном сравнении результатов, на наш взгляд, пока ещё преждевременно, хотя качественное соответствие результатов можно признать вполне удовлетворительным.

Также для исследования зависимости вертикальной левитационной составляющей («грузоподъёмности») силы взаимодействия различных инженерных, геометрических и пространственных комбинаций систем «трасса РЗМ - ВТСП подвижный элемент-«левитер»» от левитационного зазора между ними, был использован доработанный и адаптированный вариант автоматизированного исследовательского стенда измерения левитационных характеристик. Схема стенда и его фотография представлены на Рис. 9.

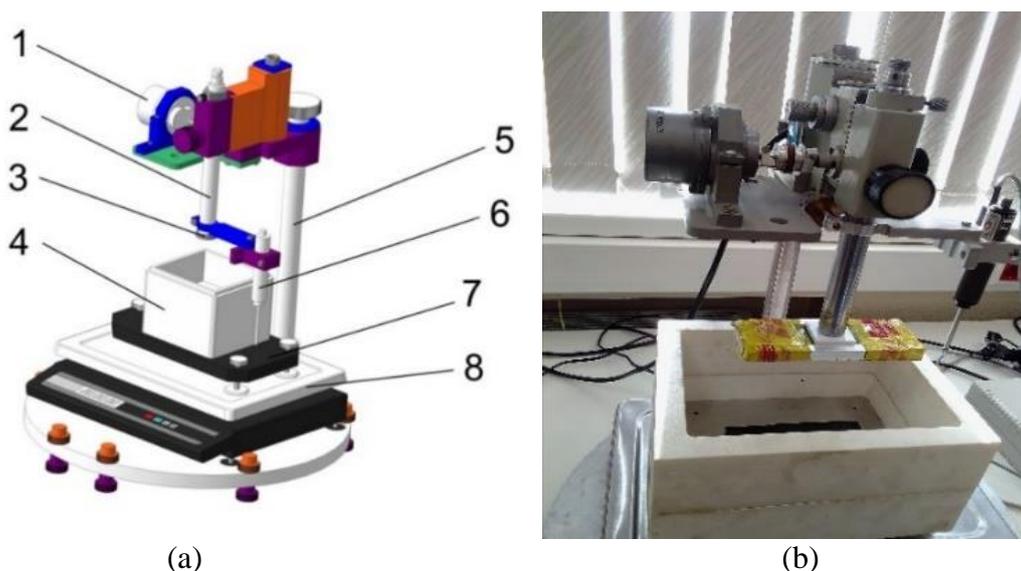


Рис. 9. Схема и фотография устройства для измерения сил левитации:

- 1 – редукторный двигатель; 2 – шток;
- 3 – фрагмент трассы из постоянных NdFeB магнитов;
- 4 – теплоизолированная кювета; 5 – стойка; 6 – датчик перемещения;
- 7 – тяжелое основание; 8 – электронные весы

Установка позволяет проводить измерения и экспериментальные исследования в широком диапазоне изменения основных влияющих на характеристики левитационной системы факторов и параметров. В частности, на ней было получено экспериментальное подтверждение приемлемого соответствия результатов закону аддитивности отдельных, описанных ранее [8, 10], составляющих площади рабочей поверхности

ВТСП элементов левитера, при их взаимодействии с трассой ВМЛТ. Это подтверждает хорошие перспективы прямого масштабирования и переноса экспериментальных результатов, полученных на малогабаритных, или «потешных» моделях ВМЛТ, на более габаритные и презентабельные макеты следующего поколения. Ниже приведены некоторые примеры характерных результатов измерений, полученных на установке в различных условиях эксперимента (Рис. 10).

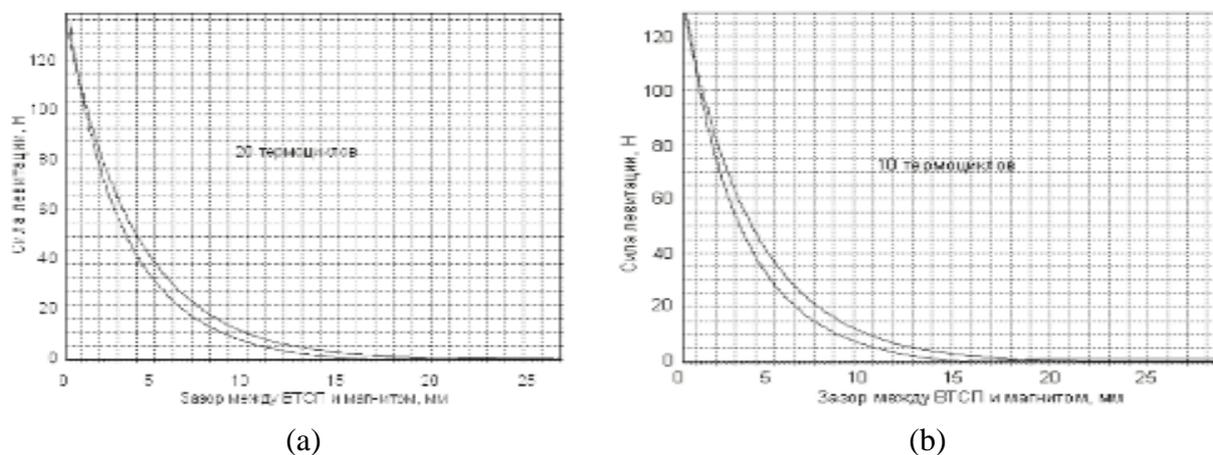


Рис. 10. Пример характерных зависимостей силы левитации от расстояния для образца (а) после 20 термциклов; (б) после 10 термциклов

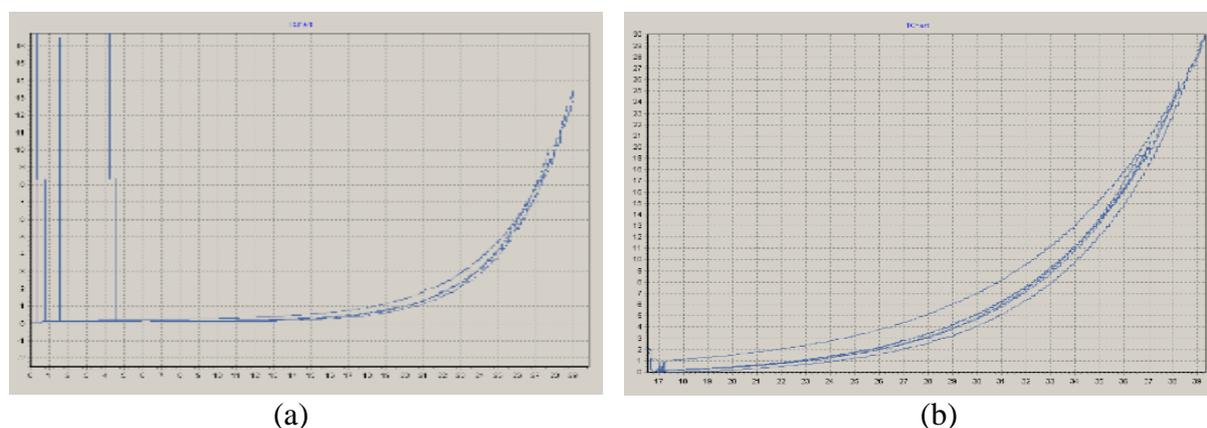


Рис. 11. Вид типичных исходных зависимостей силы левитации (в кгс по оси y) от расстояния трасса ВТСП (в мм по оси x) до проведения обработки результатов эксперимента

По результатам этих экспериментальных исследований была предложена, создана и испытана масштабированная трасса грузоподъёмностью свыше 80 кг (при левитационном зазоре от 3 до 5 мм), которая может состоять или из двух элементов по два метра (Рис. 11а), или из одного элемента четырёх метров длины (Рис. 11б).



Рис. 12. Масштабированная трасса: (а) длина 2 м; (б) длина 4 м

Масштабированная трасса на которой отрабатываются макеты конструкций более габаритных подвижных (левитирующих) элементов, как в грузовом (Рис. 12а), так и в пассажирском (Рис. 12б), возможных вариантах их использования в проводимых нами тестовых экспериментах:

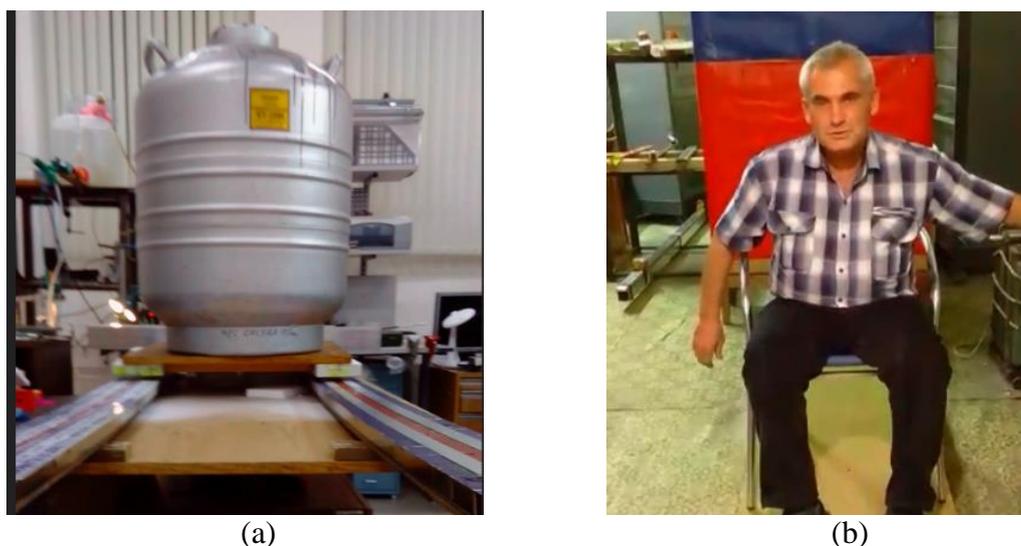


Рис. 13. Левитер: (а) грузовой вариант; (б) пассажирский вариант

Параллельно, коллегами из ИПТМ СО РАН, как и планировалось нами ранее [10], проведены расчётно-экспериментальные работы по моделированию процессов термоаэродинамики элементов ВМЛТ [29, 30], разработаны и созданы соответствующие экспериментальные стенды и установки, на которых было проведено несколько циклов расчётно-экспериментальных исследований. Так, например, предварительное экспериментальное исследование аэродинамики простейшей модели транспортного средства вакуумно-левитационной транспортной системы в путепроводе в условиях разреженного ( $P = 200 \div 1000$  Па) воздушного потока с числами Маха от  $M=0,1$  до  $M=5$  выполнены на аэродинамической установке «МАУ» ИПТМ СО РАН. Моделирование полета выполнено по обращенной схеме, когда неподвижная модель обдувается потоком воздуха с заданными параметрами.

Вход канала-путепровода ( $\varnothing 100$  мм) пристыковывается к соплу аэродинамической установки. Выход канала, патрубком ( $\varnothing 200$  мм), соединяется с вакуумной ёмкостью объемом  $220 \text{ м}^3$ . Принципиальная схема эксперимента, общий вид экспериментального стенда и более подробное описание писание результатов экспериментов приведены в [28–30]. Для проведения испытаний была изготовлена модель транспортного средства ( $\varnothing 70$  мм) с встроенными двухкомпонентными тензовесами.

С целью определения коэффициентов аэродинамического сопротивления транспортного средства простой геометрии, по мере его ускорения из состояния покоя до большой сверхзвуковой скорости, выполнена серия расчетов нестационарного процесса разгона. Расчеты выполнены для нескольких вариантов размеров транспортного средства, при неизменной геометрии трубопровода. Расчет нестационарного процесса разгона выполнен с помощью пакета численного моделирования Fluent. Решались нестационарные уравнения Навье-Стокса для невязкого течения в ассиметричной постановке. В качестве рабочего газа рассматривался воздух. Давление разрежения воздуха в трубопроводе принималось равным  $P_{\infty}=1000$  Па.

В результате выполненной серии численного моделирования разгона получены обобщенные результаты аэротермодинамических характеристик модели транспортного средства. На Рис. 14 представлены зависимости для различных геометрических вариантов, изображающие изменение коэффициента аэродинамического сопротивления ( $C_x$ ) модели транспортного средства по мере его разгона.

Полученные аэродинамические характеристики дают возможность для любых выбранных геометрических размеров транспортного средства и степени разрежения вакуумной среды определить количественные

значения ожидаемых аэродинамических нагрузок и требуемой мощности привода для их преодоления.

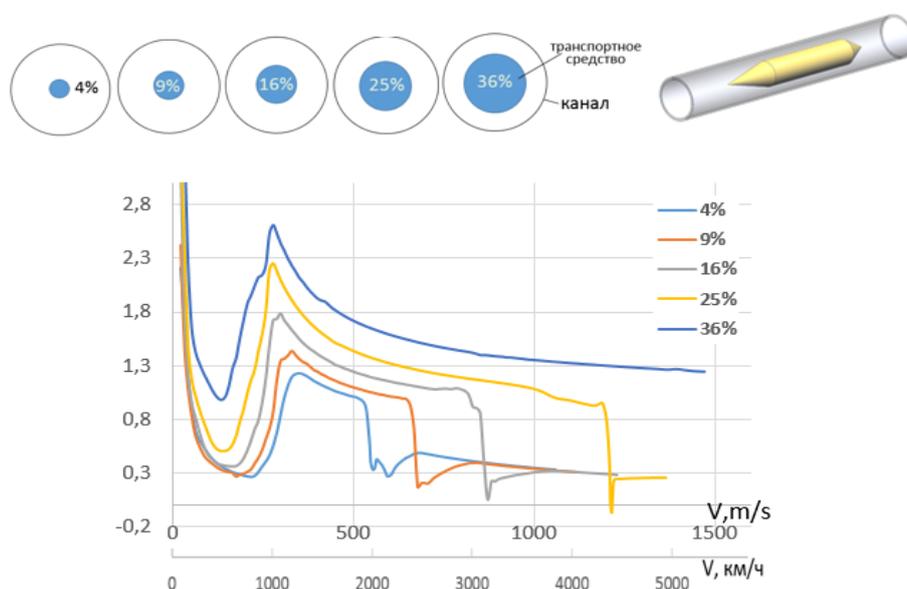


Рис. 14. Кривые зависимостей коэффициента аэродинамического сопротивления транспортного средства от скорости движения

Выполнены и подтверждены оценки ожидаемых нами неприемлемо высоких, по сравнению с ВМЛТ, значений аэродинамических нагрузок и требуемой мощности привода, в путепроводе с характерным, например, для программы Hyperloop, давлением 0,01 атмосферы, или 1000 Па даже для гипотетического грузового транспортного средства диаметром 1,3 м.

На Рис. 15 показаны ожидаемые аэродинамическое сопротивление транспортного средства и требуемые мощности на его преодоление. При оценке искомых величин рассматривались несколько вариантов геометрических конфигураций. Анализировались случаи движения транспортных средств одного размера в путепроводах разного диаметра.

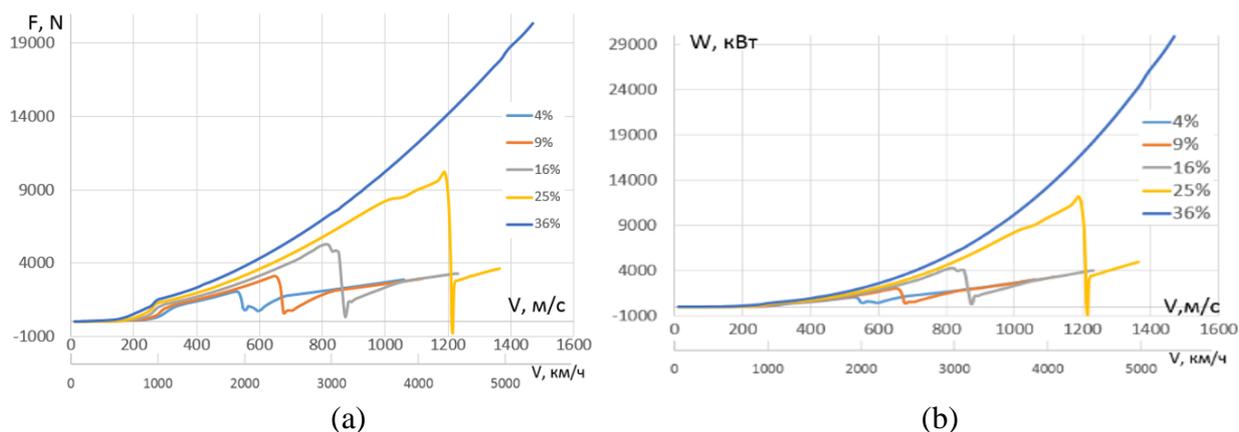


Рис. 15. Ожидаемые (а) аэродинамическое сопротивление транспортного средства и (b) требуемые мощности на его преодоление

Полученный результат наглядно демонстрирует, что для условий программы, например, Hyperloop, необходимость снижения энергетических затрат на преодоление аэродинамического сопротивления требует существенного увеличения размеров вакуумного путепровода в поперечном сечении. Так, для транспортного средства даже с малым диаметром 1,3 м, наименьшие затраты энергии из полученных соответствуют путепроводу диаметром 6,5 м. Наибольшие затраты энергии соответствуют путепроводу диаметром 4,7 м.

По предварительным оценкам, стоимость путепровода имеет кубическую зависимость от его диаметра.

Поиск оптимального соотношения, с экономической точки зрения давлений, размера путепровода и энергетических затрат на преодоления силы аэродинамического сопротивления в вакуумных транспортных технологиях, является очень важным предметом дальнейших исследований.

В комплексе с численными методами исследования, в рамках данной работы, развивается перспективное направление прямого моделирования процесса движения модели транспортного средства. Для этого, как уже отмечалось, в ИТПМ СО РАН в 2017 году была разработана и запущена в изготовление малогабаритная баллистическая установка, которая состоит из четырех основных частей: ресивера, пускового механизма, ствола, поддерживающей рамы и улавливателя. Ресивер представляет собой баллон объемом  $0,08 \text{ м}^3$ , оснащенный клапаном для подачи газа и манометром для контроля давления. Истечение из ресивера происходит через выходное отверстие, которое соединяется с пускающим механизмом через уплотнительную линзу. Внутренний диаметр выходного отверстия ресивера 60 мм. Далее следует пусковое устройство (Рис. 16), задача которого удерживать модель с поддоном и, в нужный момент, освобождать от захвата. К пусковому устройству пристыковывается ствол.



Рис. 16. Пусковое устройство и ствол на опорах

Ствол состоит из трех секций длиной 1,5 м и внутренним диаметром 50 мм, соединённых между собой фланцевым соединением. Для минимизации сил сопротивления, секции выполнены из хонингованных труб. В качестве толкающего газа используется воздух или гелий. Рассматривается возможность предварительного нагрева толкающего газа в ресивере (кауперным подогревателем) с целью повышения его реактивных свойств. Запуск поддона с моделью осуществляется следующим образом. Компрессор нагнетает толкающий газ в ресивер до нужного значения. Образующиеся давление удерживается при помощи уплотнительной манжеты, установленной на поддоне. Поддон упирается в кулачки, погруженные в специальные пазы. При вращении фланцев пускового механизма кулачки прячутся в паз, освобождая путь поддону. Поддон, под действием давления рабочего газа, ускоряется в стволе. Вылетая из ствола, поддон под действием аэродинамических сил раскрывается, освобождая модель. Модель далее движется самостоятельно до встречи с уловителем.

Регистрация скорости модели производится при помощи оптического рамочного хронографа типа «Стрелец» АСС 0022. Данный хронограф может регистрировать скорость в диапазоне от 15 до 3000 м/с, при этом относительная погрешность измерения скорости составляет 0,5 %.

На баллистической установке проведены предварительные, калибровочные эксперименты при скорости разгоняемой модели вплоть до 400 метров в секунду (1440 км/час.).

Серия испытаний включала ускорение тел массой  $m \approx 100 \div 115$  граммов. Полученные экспериментальным путем скорости сравнивались с результатами расчета ускорения тела по одномерной теоретической модели движения снаряда с поддоном по стволу.

Результаты сравнения теоретических и экспериментальных значений скорости, приведены в Табл.

Таблица. Результаты сравнения теоретических и экспериментальных значений скорости

№	m, кг	P, Па	Uт., м/с	Uэкс, м/с	Δ
1	0,115	500000	236	180	56
2	0,108	1000000	323	269	54
3	0,103	1500000	380	316	64
4	0,102	2000000	418	340	78
5	0,102	2000000	418	397	21

В таблице: m – суммарная масса модели и поддона, P – начальное значение толкающего газа, Uт – теоретическая скорость тела на выходе из ствола, Uэкс – скорость тела на выходе из ствола полученная в эксперименте,  $\Delta = U_t - U_{\text{экс}}$ .

Полученные отличия скоростей в испытаниях 1–4 обусловлены, имеющем место, наличием утечек толкающего газа по длине ствола и трением поддона о внутренние стенки ствола. Устранение утечек привело к уменьшению разности теоретической и экспериментальной значений скоростей (Испытание № 5). Важным результатом является и то, что в процессе выполнения тестовых испытаний возникло множество нареканий по эксплуатации используемого оптического рамочного хронографа «Стрелец» АСС 0022 и сложностей по интерпретации результатов измерения в виду большого числа ложных срабатываний. Попытки изолирования прибора от вибраций, воздействий истекающей струи и др. не дали удовлетворительного результата. Поэтому, для определения скорости полета модели, в условиях аэробаллистического эксперимента, исполнителями была изготовлена и испытана двухкаскадная оптическая система регистрации скорости. Каждый каскад оптической системы состоит из источника оптического излучения (миниатюрный диодный лазер, 100 мВт) и приемника. На Рис. 17 представлена 3D модель оптической системы.

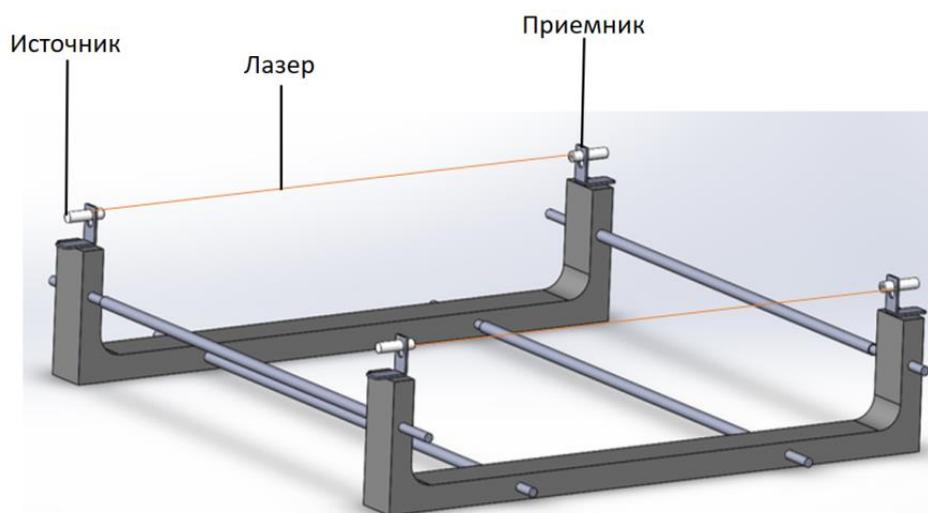


Рис. 17. 3D модель оптической системы

Система устанавливается так, чтобы пролетающий объект пересекал оба лазера. При выполнении пуска установки, с помощью аппаратуры, фиксируется сигнал-напряжение с приемников оптического излучения. По известному расстоянию между лучами и времени отклика приемников, можно определить скорость летящего объекта. В настоящее время система находится на стадии экспериментальной отработки, а в дальнейшем планируется возможное проведение серии экспериментов непосредственно с аналогичными элементами макетов левитирующей над РЗМ-трассой капсулы бездренажного криостата с ВТСП блоками внутри. Также в процессе экспериментов возможна визуализация картины течения около модели оптическими методами.

Также на территории ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН при участии специалистов из МАИ [14, 15] предпринята успешная попытка создания экспериментального «потешного», маломасштабного макета участка ВМЛТ на основе различных вариантов трасс из редкоземельных магнитов (РЗМ) NdFeB и вариантов высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) – левитеров на основе керамики Y-Ba-Cu-O [5, 11, 17] (Рис.18).

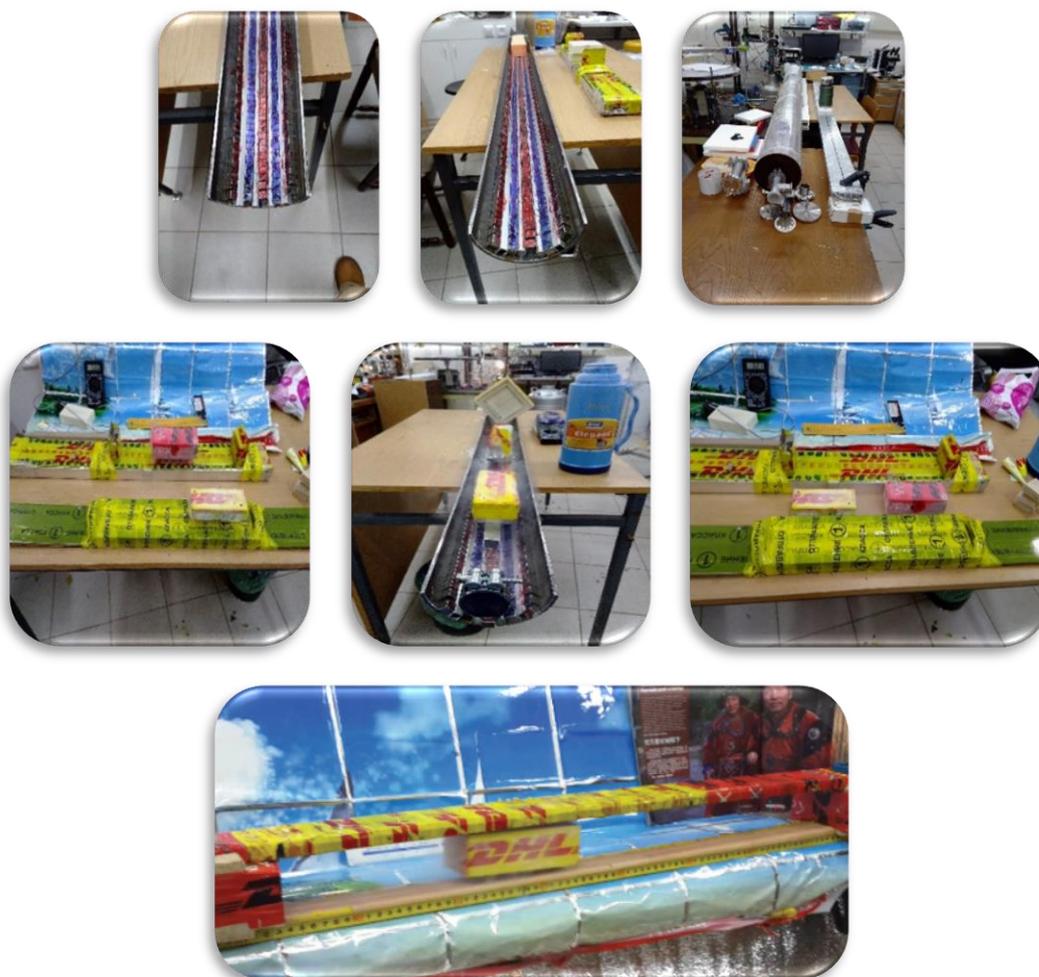


Рис. 18. Некоторые макеты трасс испытательного стенда ВМЛТ на территории ИРЭ

Макеты исследуемых на нём различных вариантов пространственных конфигураций макетов трасс ВМЛТ позволяют в заданных пределах моделировать основные технологические режимы работы полноразмерной ВМЛТ.

В настоящее время на этой экспериментальной базе проводится серия качественных калибровочных экспериментов, изготовление и проверка различных инновационных версий в простейшем или «атмосферном» варианте комбинаций трасс из постоянных РЗМ высокоэнергетических NdFeB магнитов и находящихся в различных, пока простейших, моделях криостатов, сборок объёмных элементов из ВТСП, которые сейчас поддерживаются пока при температуре 77 К, кипения жидкого азота.



Рис. 19. Один из макетов ВМЛТ на входе в вакуумную оболочку

На макетах теоретически и экспериментально исследуются различные варианты пространственных конфигураций расположения постоянных РЗМ магнитов, связь с напряженностью магнитного поля достигаемой вблизи транспортного пути, а также сила взаимодействия подвижного макета транспортного средства с трассами на постоянных магнитах при различных левитационных зазорах и способах активации сверхпроводникового элемента, в том числе, в режиме «замороженного магнитного потока» в ВТСП.

По мере необходимости, на соответствующих дополнительных экспериментальных стендах и установках, после их доработки и адаптации, исследуются возможности (после их метрологической аттестации) получения всех необходимых для дальнейшего масштабирования экспериментального стенда ИРЭ количественных

экспериментальных данных (Рис. 20) по основным критическим технологическим параметрам модельного ВМЛТ следующего поколения:

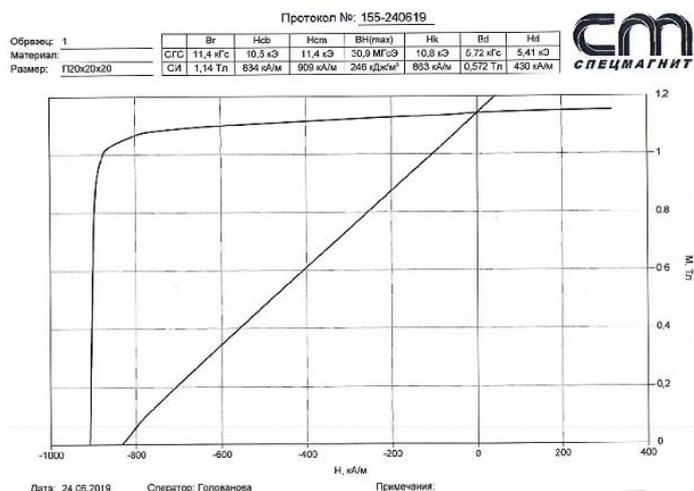


Рис. 20. Пример получаемых параметров исходных магнитов

Стоит отдельно отметить, что в рамках создания модели планируется активно использовать современные аддитивные технологии и материалы (3d-печать) компании «Роботех», обрабатывающие 3d центры на базе станков с ЧПУ, в том числе и элементы лазерной автоматической обработки материалов, сверхпроводниковые обмотки – составляющие элементы трассы ВМЛТ, микрокриогенные системы (МКС) криостатирования ВТСП на уровне температур 60-100 К с КПД на уровне 10-12 % от цикла Карно и на более низком уровне температур.

Фотография левитации массо-габаритного макета одной из которых над трассой приведена на Рис. 21.



Рис. 21. Левитация массо-габаритного макета СМС на борту левитера над трассой из РЗМ



Будут использованы также немагнитные и работающие в вакууме до  $10^{-7}$  Па системы 3d позиционирования и т.д., различные варианты вакуумных оболочек (Рис. 22). Это является производственно-технологической отработкой создаваемой модели с возможностью её последующего полупромышленного масштабирования.



Рис. 22. Некоторые варианты исследуемых вакуумных оболочек, что по сути является производственно-технологической отработкой создаваемой модели с возможностью её последующего полупромышленного масштабирования

При этом уже сейчас некоторые общие лабораторные результаты показывают, что первоначальные страхи экономической неэффективности разрабатываемой транспортной системы практически являются несостоятельными, а фактические издержки на обеспечение ВТСП эффекта сопоставимы с существующими аналогами в виде затрат на железнодорожный транспорт, но при этом достигаемые скоростные показатели и показатели энергетической эффективности, значительно превосходят потенциал развития железнодорожного «колесного» и атмосферного маглев транспорта.

Итак, в соответствии с предварительным планом работ, намеченным нами в работе [10], в течение последнего времени коллективом авторов доклада с коллегами была проведена серия предварительных (по причине того, что полная метрологическая аттестация оборудования пока ещё не проводилась из-за отсутствия необходимого и достаточного объёма финансирования) работ по созданию новых и предварительному испытанию пригодности и работоспособности некоторых уже существующих экспериментальных стендов и методик междисциплинарных научно – технических и расчётно-теоретических исследований для проведения необходимой отработки отдельных основных составляющих критических элементов технологии ВМЛТ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Технологии и варианты дальнейшего развития высоко- и сверхвысокоскоростных транспортных средств, объединенных в единую ИТТС, несомненно, экономически выгодны и политически необходимы для России, но на базе традиционных вариантов транспортных систем эта проблема не решаема. Необходимы новые, прорывные и нетрадиционные, научно-технические решения и разработки.

2. Особенно привлекательна реализация сверхскоростных транспортных путей на основе ВМЛТ, обладающих, в принципе непревзойденной скоростью, экономичностью и энергетической эффективностью.

3. На данном этапе работ выделены несколько ключевых критических направлений проработки принципиальной возможности создания ВМЛТ: величина левитационной силы в системе «трасса на ПМ – подвижный элемент-левитер на ВТСП», особенности процесса охлаждения ВТСП в подвижной капсуле ВМЛТ, разгон, торможение и рекуперация энергии в линейном синхронном двигателе ВМЛТ, аэродинамическое и иное сопротивление в вакуумном канале ВМЛТ.

4. Экспериментально подтверждена возможность масштабирования пилотных проектов ВМЛТ на базе результатов исследований, проведенных

на предварительном миниатюрном, или «потешном» макете, что позволяет создать пилот-макет «среднего масштаба». В случае его успешного функционирования можно будет перейти к созданию и испытанию более масштабных систем, но для более тщательного обоснования пилотных проектов ВМЛТ, ещё необходимо выполнить большой объем разносторонних фундаментальных теоретических и экспериментальных работ.

5. Необходимо решением правительства РФ признать важность проекта на государственном уровне и включить работы по созданию и развитию МЛТ и ВМЛТ в «Стратегию развития транспорта на период до 2030 года».

#### 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. Журавлева Н.А., Паньчев А.Ю. Проблемы экономической оценки скорости в транспортно-логистических системах в новом технологическом укладе // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – №4. – С. 150–178. [Zhuravleva NA, Panychev AYU. Problems of economic assesment of speed in transport and logistical systems in the new technological paradigm. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(4):150-178.] doi: 10.17816/transsyst201734150-178
2. Дроздов Б.В. О перспективном облике глобальной транспортной системы // Сборник «Культура. Народ. Экофера», труды социокультурного семинара имени Бугровского. Выпуск 10. – М.: "Спутник+", 2017. [Drozdov BV. O perspektivnom oblike global'noj transportnoj sistemy. *Sbornik "Kul'tura. Narod. Ekosfera"*, trudy sociokul'turnogo seminar imeni Bugrovskogo. 2017;(10). (In Russ.)].
3. Росатом собрался потратить \$7 млрд. на мировое лидерство в морских перевозках. Доступно по: <https://www.warandpeace.ru/ru/news/view/144506/> Ссылка активна на: 25.11.2019.
4. Busting the myth of China's New Silk Roads. [cited 2019 Nov 25] Available from: <https://www.asiatimes.com/2019/11/article/busting-the-myth-of-chinas-new-silk-roads/>.
5. Альметова З.В., Шеремет А.А., Самарцева А.В., Долгушина Н.Ю. Интеграционные процессы транспортных систем евразийского экономического союза // Экономика и менеджмент. – 2019. – Т. 12. – №. 3. – С. 161-168. [Al'metova ZV, Sheremet AA, Samarceva AV, Dolgushina NYU. Integration Processes in Transport Systems of Eurasian Economic Union. *Economics and Management*. 2019;12(3):161-168. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 03.12.2019. Доступно по: <https://vestnik.susu.ru/em/article/view/8293>
6. Дроздов Б.В., Терентьев Ю.А. Перспективы вакуумного магнитолевитационного транспорта // Мир транспорта. – 2017. – Т. 15. – №1. – С. 90–99. [Drozdov BV, Terentyev YuA. Prospects for Vacuum Magnetic-Levitation Transport. 2017;15(1):90-99. (In Russ.)].

7. Филимонов В.В., Малинецкий Г.Г., В.С. Смолин и др. Вакуумный магнитолевитационный транспорт и транспортные коридоры России. / Сборник трудов международной конференции «Проектирование будущего и горизонты цифровой реальности», Москва, 08-09.03.2018г. [Filimonov VV, Malineckij GG, Smolin VS. et al. Vakuumnyj magnitolevitacionnyj transport i transportnye koridory Rossii. In Sbornik trudov mezhdunarodnoj konferencii “Proektirovanie budushchego i gorizonty cifrovoj real'nosti”. Moscow, 08-09.03.2018. (In Russ.)].
8. Филимонов В.В., Малинецкий Г.Г., Смолин В.С. и др. Высокоскоростные транспортные коридоры как один из механизмов реализации национальной идеи России // XIII международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология», Москва, КВЦ «Сокольники», 12–14 апреля, 2018. [Filimonov VV, Malineckij GG, Smolin VS. et al. Vysokoskorostnye transportnye koridory kak odin iz mekhanizmov realizacii nacional'noj idei Rossii. In Proceedings the XIII mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya “Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologiya”. Moscow, KVC “Sokol'niki”, 12-14 april 2018. (In Russ.)].
9. Lyovin BA, Davydov AM, Kurenkov PV, et al. The development of criteria for evaluating energy efficiency and the choice of the optimal composition of the subsystems in the russian integral transit transport system. In Proceedings the 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications. Osaka, Japan, 2017.
10. Terentyev YuA, Filimonov VV, Malinetskiy GG, Smolin VS, et al. Russia integrated transit transport system (ITTS) basid on vacuum magnetic levitation transport (VMLT). *Transportaion Systems and Technology*. 2018;4(3 suppl. 1):57-84. doi: 10.17816/transsyst201843s157
11. ИА REGNUM: ожидается взрывной рост контейнерного транзита Китай – ЕАЭС – Евросоюз. Доступно по: <https://regnum.ru/news/2396956.html> Ссылка активна на: 04.12.2019.
12. Yang C, Lan S, Tseng ML. Coordinated development path of metropolitan logistics and economy in Belt and Road using DEMATEL–Bayesian analysis //International Journal of Logistics Research and Applications. 2019;22(1):1-24.
13. Никитин Н.А. Пути совершенствования процесса организации международных контейнерных перевозок // European Scientific Conference. – 2019. – С. 74-76. [Nikitin NA. The Ways of Improving Organization Process in the International Container Transportations. *European Scientific Conference*. 2019:74-76. (In Russ.)].
14. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA *Magnitolevitatsionnaia transportnaia tekhnologiya*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 476 p. ISBN 978-5-9221-1540-7 (In Russ.)].
15. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / под ред. Ю.Ф. Антонова, А.А. Зайцева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 612 с. [Zaitsev AA, Antonov YuF, editors. *Magnitolevitacionnyj transport: nauchnye problemy i tekhnicheskie resheniya*. Moscow: FIZMATLIT; 2015. 612 p. (In Russ.)].
16. Зайцев А.А., Талашкин Г.Т., Соколова Я.В., Морозова Е.И. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны. – СПб.: Изд-во ООО «Типография «НП-Принт», 2015. – 140 с. [Zaitsev AA, Talashkin GT, Sokolova IV, Morozova EI. *Magnitolevitatsionnyi transport v edinoi transportnoi sisteme strany*. St. Petersburg: NP-Print; 2015. 140 p. (In Russ.)].

17. Technical-economical comparison of Maglev and High Speed Systems. The website of the Transportation and Infrastructure Committee. [cited 2019 July 15]. Available from: <http://archives.republicans.transportation.house.gov/Media/File110th/Rail/3-20-07-roundtable-Bradydornier.pdf>
18. Альметова З.В., Ларин О.Н. Методические принципы формализации транзитных сообщений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. – 2014. – Т. 8. – №. 4. – С. 159–163. [Almetova ZV, Larin ON. Methodological Principles of Transit Traffic Formalization. *Bulletin of South Ural State University. Series "Economics and Management"*. 2014;8(4):159-163. (In Russ.)].
19. Островская Г.В. Магнитные дороги профессора Вейнберга (К 100-летию лекции «Движение без трения») // Вестник науки Сибири. – 2014. – № 2 (12). – С. 6–14. Ostrovskaya G.V. Magnitnye dorogi professora Vejnberga (K 100-letiyu lektsii "Dvizhenie bez treniya"). *Journal of Wellbeing Technologies*. 2014;2(12):6-14.
20. ET3 online education. *The website of the Evacuated Tube Transport Technology*. [cited 2019 May 15]. Available from: <http://et3.eu/et3-online-education.html>
21. Трофимова Валентина Владимировна Развитие интернет-торговли в России и мире // Бизнес-образование в экономике знаний. – 2018. – № 2 (10). Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-internet-torgovli-v-rossii-i-mire> Ссылка активна на: 17.03.2019.
22. Журнал Forbes: Amazon стала крупнейшей компанией в мире по капитализации. Доступно по: <https://www.forbes.ru/tehnologii/369929-amazon-stala-krupneyshey-kompaniey-v-mire-po-kapitalizacii> Ссылка активна на: 17.03.2019.
23. Нестеров С.Б., Кондратенко Р.О., Капитоненко А.И., и др. Почтовая доставка на основе магнитной левитации в разреженной среде. XXIV Научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» Судак, 16–23 сентября 2017 г. – 247 с. [Nesterov SB, Kondratenko RO, Kapitonenko AI, et al. Pochtovaya dostavka na osnove magnitnoj levitacii v razrezhennoj srede. In Proceedings the XXIV Nauchno-tehnicheskaya konferenciya s uchastiem zarubezhnyh specialistov "Vakuumnaya nauka i tekhnika" Sudak, 16–23 September 2017. 247 p. (In Russ.)].
24. Deng Z, Zhang W, Zheng J, et al. A High-Temperature Superconducting Maglev-Evacuated Tube Transport (HTS Maglev-ETT) Test System. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2017;27(6):1-8. doi: 10.1109/tasc.2017.2716842
25. Sun RX, Zheng J, Zhan LJ, et al. Design and fabrication of a hybrid maglev model employing PML and SML. *International Journal of Modern Physics B*. 2017;31(25):1745014. doi: 10.1142/s021797921745014x
26. Ковалёв Л.К., Ковалёв К.Л., Конеев С.М.-А. и др. Магнитные подвесы с использованием объёмных ВТСП элементов. // Труды МАИ. – 2010. – № 38. – С. 39. [Kovalyov LK, Kovalyov KL, Koneev SM-A, et al. Magnitnye podvesy s ispol'zovaniem ob'yomnyh VTSP elementov. *Trudy MAI*. 2010(38):39. (In Russ.)]. Доступно по: <https://readera.ru/14326225> Ссылка активна на: 04.12.2019.
27. Ковалёв Л.К., Конеев С.М., Полтавец В.Н., Гончаров М.В. и др. Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников / Под ред. Л.К. Ковалёва., К.Л. Ковалёва, С.М.-А. Конеева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 396 с. [Kovalyov LK, Koneev SM, Poltavets VN, et al. Elektricheskie mashiny i ustrojstva na osnove massivnyh vysokotemperaturnyh sverhprovodnikov. Kovalyov LK, Kovalyov KL, Koneev SM-A, edditors. Moscow: FIZMATLIT, 2010. 396 p. (In Russ.)].

28. Терентьев Ю.А., Коледов В.В., Ильясов Р.И. и др. Подготовка экспериментальной базы и результаты начального этапа экспериментальной отработки критических элементов технологии ИТТС России на базе Вакуумного Магнито-Левитационного Транспорта / XIV международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология», Москва, КВЦ «Сокольники», 16–17 апреля, 2019. [Terent'ev YuA, Koledov VV, Il'yasov RI, et al. Podgotovka eksperimental'noj bazy i rezul'taty nachal'nogo etapa eksperimental'noj otrabotki kriticheskikh elementov tekhnologii ITTS Rossii na baze Vakuumnogo Magnito-Levitacionnogo Transporta. In Proceedings the XIV mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya "Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologiya", Moscow, KVC "Sokol'niki", 16-17 april, 2019. (In Russ.)].
29. Фомин В.М., Звегинцев В.И., Наливайченко Д.Г., Терентьев Ю.А. Вакуумный магнитолевитационный транспорт: поиск оптимальных рабочих параметров // Транспортные системы и технологии. – 2016. – Т. 2. – №3. – С. 18–35. [Fomin VM, Zvegintsev VI, Nalivaichenko DG, Terent'ev YuA. Vacuum magnetic levitation transport: definition of optimal characteristics. *Transportation Systems and Technology*. 2016;2(3):18-35. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20162318-35
30. Zvegintsev VI, Morozov SO, Nalivaychenko DG. Gas dynamics of the uniform body acceleration in the channel. *AIP Conference Proceedings*. 2018. doi: 10.1063/1.5065106

**Сведения об авторах:**

Юрий Алексеевич Терентьев;  
ORCID: 0000-0002-0888-9057;  
E-mail: teren\_y@mail.ru

Филимонов Валерий Владимирович; ORCID: 0000-0002-0139-8888;  
E-mail: valery-filimonov@mail.ru

Шавров Владимир Григорьевич, д.ф.-м.н., профессор;  
eLibrary SPIN: 9533-8188; ORCID: 0000-0003-0873-081X;  
Web of Science ResearcherID: F-4247-2014; Scopus: 7005121553;  
E-mail: shavrov@cplire.ru

Коледов Виктор Викторович, д.ф.-м.н., с.н.с.;  
eLibrary SPIN: 9291-1989; ORCID: 0000-0002-2439-6391;  
Web of Science ResearcherID: F-4259-2014; Scopus: 8593554700;  
E-mail: victor\_koledov@mail.ru

Фонградовски Светлана Вячеславовна;  
E-mail: svetlana.gratowski@yandex.ru

Суслов Дмитрий Алексеевич;  
eLibrary SPIN: 5076-1563; ORCID: 0000-0002-1962-1195;  
E-mail: sda\_53@mail.ru

Малинецкий Георгий Геннадьевич, д.ф.-м. н. , профессор;  
eLibrary SPIN: 5684-2049; ORCID: 0000-0001-6041-1926;  
E-mail: gmalin@keldysh.ru

Ковалёв Константин Львович, д. т. н., проф.,  
eLibrary SPIN: 6208-1338; ORCID: 0000-0002-2699-4985  
E-mail: klink@mail.ru

Ильясов Роман Ильдусович, к.т.н., доцент  
eLibrary SPIN: 9734-4566; ORCID: 0000-0001-7409-3877;  
Web of Science ResearcherID: K-8514-2017; Scopus: 56202087500;  
E-mail: ilyasov@mai.ru

Полтавец Владимир Николаевич, к.т.н., с.н.с.,  
eLibrary SPIN: 7522-9271; ORCID: 0000-0002-6334-0796;  
E-mail: vnpoltavets@ya.ru

Куренков Пётр Владимирович, д.э.н., к.т.н., профессор;  
eLibrary SPIN: 3244-2983; ORCID: 0000-0003-0994-8546;  
Scopus: 57189075195;  
E-mail: petrkurenkov@mail.ru

Камынин Антон Владимирович; eLibrary SPIN: 6807-6187;  
E-mail: ont@s-magnet.ru

Дроздов Борис Викторович, д.т.н.; ORCID: 0000-0003-1722-8901;  
E-mail: drozdovbv@mail.ru

Нижельский Николай Александрович, к.т.н.;  
eLibrary SPIN ID: 5930-4808;  
E-mail: nizhelskiy@rambler.ru

Сысоев Михаил Алексеевич;  
E-mail: ujikolp@bk.ru

Ясев Сергей Геннадьевич;  
E-mail: tagul-s@mail.ru

Самвелов Андрей Витальевич, к.т.н.;  
eLibrary SPIN: 9932-6353;  
E-mail: samv-andrej@yandex.ru

Точило Валериан Владиславович; ORCID: 0000-0002-0139-8888;  
E-mail: 4ezaro@mail.ru

Моисеенко Виктория Львовна; ORCID: 0000-0002-9972-1558;  
E-mail: viking3922@gmail.com

Осипов Виталий Максимович; ORCID: 0000-0002-7577-9982;  
E-mail: vit@quess.tech

Алфимов Александр Витальевич;  
eLibrary SPIN: 4707-2695; ORCID: 0000-0002-6971-6328;  
E-mail: ava2@bk.ru

Бражник Петр Александрович;  
E-mail: xocenk@mail.ru

Фомин Василий Михайлович, Академик РАН;  
eLibrary SPIN: 1503-6366; ORCID: 0000-0002-2811-0143;  
Scopus: 55180871100; Web of Science ResearcherID: Q-1570-2015  
E-mail: fomin@itam.nsc.ru

Наливайченко Денис Геннадьевич, к.т.н.;  
eLibrary SPIN: 6233-2701; ORCID: 0000-0003-4988-0507;  
Scopus: 14832899900; Web of Science ResearcherID: P-4571-2014  
E-mail: denis@itam.nsc.ru

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

Соломин Владимир Александрович, д.т.н., профессор;  
eLibrary SPIN: 6785-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;  
E-mail: ema@rgups.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 authors:**

Yuri A. Terentyev; ORCID: 0000-0002-0888-9057;  
E-mail: teren\_y@mail.ru

Valery V. Filimonov; ORCID: 0000-0002-0139-8888;  
E-mail: valery-filimonov@mail.ru

Vladimir G. Shavrov;  
eLibrary SPIN: 9533-8188; ORCID: 0000-0003-0873-081X;  
Web of Science: F-4247-2014; Scopus: 7005121553;  
E-mail: shavrov@cplire.ru

Victor V. Koledov, Dr.;  
eLibrary SPIN: 9291-1989; ORCID: 0000-0002-2439-6391;  
Web of Science: F-4259-2014; Scopus: 8593554700;  
E-mail: victor\_koledov@mail.ru

Svetlana V. Fongratowski,  
E-mail: svetlana.gratowski@yandex.ru

Dmitry A. Suslov,  
eLibrary SPIN: 5076-1563; ORCID: 0000-0002-1962-1195;  
E-mail: sda\_53@mail.ru

Georgy G. Malinetskiy, Dr., Prof.; ORCID: 0000-0001-6041-1926;  
E-mail: gmalin@keldysh.ru

Konstantin L. Kovalev, Dr., Prof.;  
eLibrary SPIN: 6208-1338; ORCID: 0000-0002-2699-4985; Scopus: 6701714096;  
E-mail: klink@mail.ru

Roman I. Ilyasov, PhD;  
eLibrary SPIN: 9734-4566; ORCID: 0000-0001-7409-3877;  
Web of Science ResearcherID: K-8514-2017; Scopus: 56202087500;  
E-mail: ilyasov@mai.ru

Vladimir N. Poltavets, PhD;  
eLibrary SPIN: 7522-9271; ORCID: 0000-0002-6334-0796;  
E-mail: vnpoltavets@ya.ru

Petr V. Kurenkov, Dr., Prof.;  
eLibrary SPIN: 3244-2983; ORCID: 0000-0003-0994-8546; Scopus: 57189075195;  
E-mail: petrkurenkov@mail.ru

Anton V. Kamynin; eLibrary SPIN: 6807-6187  
E-mail: ont@s-magnet.ru

Boris V. Drozdov, Dr.; ORCID: 0000-0003-1722-8901;  
E-mail: drozdovbv@mail.ru

Nikolay A. Nizhelskiy, PhD; eLibrary SPIN ID: 5930-4808;  
E-mail: nizhelskiy@rambler.ru

Mihail A Sysoev;  
E-mail: ujikolp@bk.ru

Sergiy G. Yasev;  
E-mail: tagul-s@mail.ru

Andrey V. Samvelov, PhD; eLibrary SPIN: 9932-6353;  
E-mail: samv-andrej@yandex.ru

Valerian V. Tochilo; ORCID: 0000-0002-0139-8888;  
E-mail: 4ezaro@mail.ru

Viktoria L. Moiseenko; ORCID: 0000-0002-9972-1558;  
E-mail: viking3922@gmail.com

Vitaliy M. Osipov; ORCID: 0000-0002-7577-9982;  
E-mail: vit@quess.tech

Aleksandr V. Alfimov;  
eLibrary SPIN: 4707-2695; ORCID: 0000-0002-6971-6328;  
E-mail: ava2@bk.ru

Petr S. Brazhnik;  
E-mail: xocenk@mail.ru

Vasily M. Fomin, Academician of RAS;  
eLibrary SPIN: 1503-6366; ORCID: 0000-0002-2811-0143;  
Scopus: 55180871100; Web of Science ResearcherID: Q-1570-2015  
E-mail: fomin@itam.nsc.ru

Denis G. Nalyvaichenko, PhD;  
eLibrary SPIN: 6233-2701; ORCID: 0000-0003-4988-0507;  
Scopus: 14832899900; Web of Science ResearcherID: P-4571-2014  
E-mail: denis@itam.nsc.ru

Viktor A. Bogachev, PhD;  
eLibrary SPIN: 2125-5198; ORCID: 0000-0003-1202-7318;  
E-mail: bogachev-va@yandex.ru

Vladimir A. Solomin, Dr., Prof.;;  
eLibrary SPIN: 6785-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;  
E-mail: ema@rgups.ru

Taras V. Bogachev, PhD;  
eLibrary SPIN: 2262-0080; ORCID: 0000-0001-9641-0116; Scopus : 57194213408;  
E-mail: bogachev73@yandex.ru

#### **Цитировать:**

Терентьев Ю.А., Филимонов В.В., Шавров В.Г. и др. Текущее состояние и перспективы развития интегральной транзитной транспортной системы (ИТТС) России на базе вакуумного магнитного левитационного транспорта (ВМЛТ) // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 25–62. doi: 10.17816/transsyst20195425-62

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

Terentyev YuA, Filimonov VV, Shavrov VG, et al. Current Status and Prospects for the Development of the Integrated Transit Transport System (ITTS) of Russia on the Basis of Vacuum Magnetic Levitation Transport (VMLT). *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):25-62. doi: 10.17816/transsyst20195425-62

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Безопасность на транспорте

УДК [UDC] 656.222

DOI 10.17816/transsyst20195463-72

© Г. М. Грошев, Ан. В. Сугоровский, А. В. Сугоровский, О. П. Кизляк,  
И. Ю. Романова, Я. В. Кукушкина

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

## КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ДИСПЕТЧЕРСКИХ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ПРИЕМОВ

В статье представлены результаты исследования, обзора и анализа многолетней практики диспетчерского регулирования и осуществлена модернизация классификации диспетчерских регулировочных приёмов, применяемых на участках, сортировочных станциях и в узлах.

**Цель:** расширить и модернизировать классификатор диспетчерских регулировочных приёмов, применяемых на участках, сортировочных станциях и в узлах.

**Метод:** анализ регулировочных приёмов, осуществляемых поездными участковыми и узловыми диспетчерами, с начала XX века.

**Результаты:** выполненные исследования диспетчерского регулирования позволили расширить и модернизировать классификатор диспетчерских регулировочных приёмов, учитывающий два признака их объединения в группы: принцип ближайшей цели и уровень развития инфраструктуры.

**Практическая значимость:** результаты исследований способствуют повышению эффективности диспетчерского регулирования эксплуатационной работы железных дорог.

**Ключевые слова:** диспетчерское регулирование, эффективность, классификатор.

Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Transport Safety

© G. M. Groshev, An. V. Sugorovsky, A. V. Sugorovsky, O. P. Kizliak,  
I. Yu. Romanova, I. V. Kukushkina

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

## MODERN SYSTEMATIZATION AND CLASSIFICATION OF DISPATCH ADJUSTMENT TECHNIQUES

The article presents the results of research, review and analysis of long-term practice of dispatching control and modernization of classification of dispatching control techniques

used in sites, marshalling yards and nodes.

**Aim:** to expand and upgrade the classifier dispatching the adjusting techniques used at stations, marshalling yards and at the nodes.

**Method:** analysis of regulatory techniques carried out by train precinct and hub dispatchers since the beginning of the XX century.

**Results:** the implemented researches of dispatching regulation allowed to expand and modernize the classifier of dispatching regulating methods, taking into account two features of their Association into groups: the principle of the nearest goal and the level of infrastructure development.

**Practical significance:** the results of the research contribute to improving the efficiency of dispatching regulation of the operation of Railways.

**Keywords:** supervisory control, efficiency, classification

## ВВЕДЕНИЕ

Диспетчерское руководство является основным элементом системы оперативного управления эксплуатационной работы железных дорог. Диспетчерскими коллективами осуществляются различные регулировочные приемы. По характеру поставленной цели их можно подразделить на *предупредительные*, принимаемые на основе прогноза заблаговременно, до возникновения затруднений в эксплуатационной работе и для предупреждения этих затруднений, и *последующие*, направленные на локализацию и ликвидацию уже возникших затруднений [1].

## ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСПЕТЧЕРСКИХ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ПРИЕМОВ

Проблема поиска рациональных приемов диспетчерского регулирования на железнодорожных направлениях, участках, в узлах и крупных станциях давно волновала ученых нашей страны [2, 3].

Опыт первых лет применения диспетчерской системы освещён в работах Д.И. Каргина, Н.В. Смирнова и В.С. Братина.

Профессор П.Я. Гордеенко, Б.А. Длугач, Н.Т. Закорко и др. в 1934-1941 гг. обобщали методы работы диспетчеров-стахановцев Кутафина, Закорко, Пастухова по ускоренному продвижению сборных поездов, сокращению технических стоянок и т.п.

Для увеличения провозной и пропускной способности участков в условиях военного времени академик В.Н. Образцов, профессора К.А. Бернгард, С.П. Бузанов, К.К. Тихонов, Б.М. Максимович, В.В. Повороженко, А.К. Угрюмов рекомендовали применение пакетных графиков, сдваивания поездов, кратной тяги, караванного движения, организацию безостановочных скрещений, обмен жезлов на стрелочных постах и другие приёмы.

В послевоенные годы опубликованы многочисленные работы К.А. Бернгарда, А.Д. Каретникова, И.Г. Тихомирова, И.Б. Сотникова, Э.И. Хаит, А.Д. Чернюгова, А.С. Перминова, А.Д. Агабекова, П.Д. Судникова, диспетчеров В.И. Карабы, К.П. Королёвой, И.М. Костырко и многих других, раскрывающие приёмы диспетчеров по ускорению развоза местного груза, повышению производительности вагонов и локомотивов, организации ритмичной работы участков и станций, формированию и продвижению тяжеловесных поездов, пополнению транзитных поездов, сокращению межпоездных интервалов, экономии топлива.

В.Н. Воробьёв показал, что прицепка группы вагонов весом 100 тонн к транзитному поезду выгодна уже при расстоянии пробега 50-100 км.

Исследованиями И.Г. Павловского, А.С. Перминова, Е.А. Сотникова, А.Д. Чернюгова и др. установлено, что пропуск сдвоенных поездов в период ремонтных работ позволяет повысить пропускную способность до 15 %, увеличить участковую скорость на 3-5 % и в 2-3 раза сократить период восстановления нормального движения. В своих работах П.А. Сышко, И.Г. Тихомирова, А.С. Перминова, П.А. Щульженко и др. исследовали эффективность пропуска поездов большого веса и большой длины как постоянной меры усиления провозной способности линий.

Существенным вкладом в обобщение и распространение передового опыта диспетчерского регулирования явились переключки диспетчеров 1969 г. и заочная сетевая планёрка движенцев 1971 г., проведенные газетой «Гудок».

Опыт работы поездных диспетчеров, эффективность применения передовых приёмов их труда, воздействие психологических факторов и ряда других условий на эффективность диспетчерского руководства движением поездов были освещены в 1983 г. в книге А.К. Угрюмова, Г.М. Грошева, В.А. Кудрявцева, Г.А. Платонова [4].

Опыт и эффективность применения диспетчерскими коллективами отделений и управлений дорог прогрессивных регулировочных приёмов и мероприятий, направленных на повышение эффективности и качества эксплуатационной работы был обобщён Г.М. Грошевым в 1985 г. в брошюре Центрального правления научно-технического общества железнодорожного транспорта [1].

В 1992 году Г.М. Грошевым, В.А. Кудрявцевым, Г.А. Платоновым, А.Д. Чернюговым в книге «Пособие поезвному диспетчеру и дежурному по отделению» было проведено широкомасштабное обобщение опыта передовых диспетчерских коллективов. Была проведена расширенная классификация регулировочных приёмов, впервые даны краткие описания технологии их применения.

В последующие годы публиковалась информация по отдельным регулировочным приёмам, при наличии автоматизированных рабочих мест поездных диспетчеров, в том числе направленных и на повышение эффективности использования перерабатывающей способности и ритмичности работы технических станций [5, 6, 7, 8, 9], а также публиковался уже ранее исследованный опыт диспетчерского регулирования. Исследования были посвящены организации автоматизированной деятельности диспетчера на АРМ, в том числе его регулировочной деятельности. Велись исследования, связанные с возникновением нештатных ситуаций в графике движения поездов. Так же методы регулирования движения поездов и пути совершенствования работы сортировочных станций в своих работах описывал Д.Ю. Левин [10, 11, 12].

В последние годы разработаны информационные технологии, алгоритмы и методики определения экономической эффективности реализации ряда регулировочных приёмов.

Обзор и анализ научных исследований, посвящённых отечественному опыту диспетчерского регулирования эксплуатационной работы на железнодорожных направлениях, участках, в узлах и на сортировочных станциях, позволил установить, что за годы существования диспетчерской системы управления на железнодорожном транспорте передовыми диспетчерами и диспетчерскими коллективами разработано и применялось много различных регулировочных приёмов.

В последние десятилетия особое внимание уделялось автоматизации конкретных функций поездных диспетчеров и разработке информационных технологий диспетчерской деятельности в условиях автоматизированных рабочих мест (АРМ).

В настоящее время ведутся разработки, которые позволяют оценить целесообразность и эффективность применения диспетчерских регулировочных приёмов как в условиях устойчивой эксплуатационной работы, так и в условиях сбойных ситуаций в современных экономических условиях [13, 14, 15, 16, 17].

## **КЛАССИФИКАЦИЯ ДИСПЕТЧЕРСКИХ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ПРИЁМОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НА УЧАСТКАХ, СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЯХ И В УЗЛАХ**

Регулировочные приемы, осуществляемые поездными участковыми и узловыми диспетчерами в повседневной работе, также могут быть компенсаторными, применяемыми в обычной эксплуатационной обстановке и в особых условиях. Являясь территориально

внутриучастковыми или внутриузловыми, они оказывают воздействие на пропуск вагонопотоков и на их обработку на станциях.

Впервые классификация приёмов оперативного диспетчерского регулирования на участках и в узлах была опубликована в 1983 году [4]. В ней приёмы оперативного диспетчерского регулирования объединены в три группы по принципу ближайшей цели. Всего рассматривалось 49 диспетчерских приёмов.

Ниже, указанная классификация представлена в виде структурной схемы (Рис. 1).



Рис. 1. Классификация диспетчерских регулировочных приёмов 1983 г.

В 1985 г. Г.М. Грошевым [1] перечень приёмов диспетчерского регулирования на участках, сортировочных станциях и в узлах расширен с объединением в пять групп. Эта классификация также представлена в виде структурной схемы (Рис. 2).

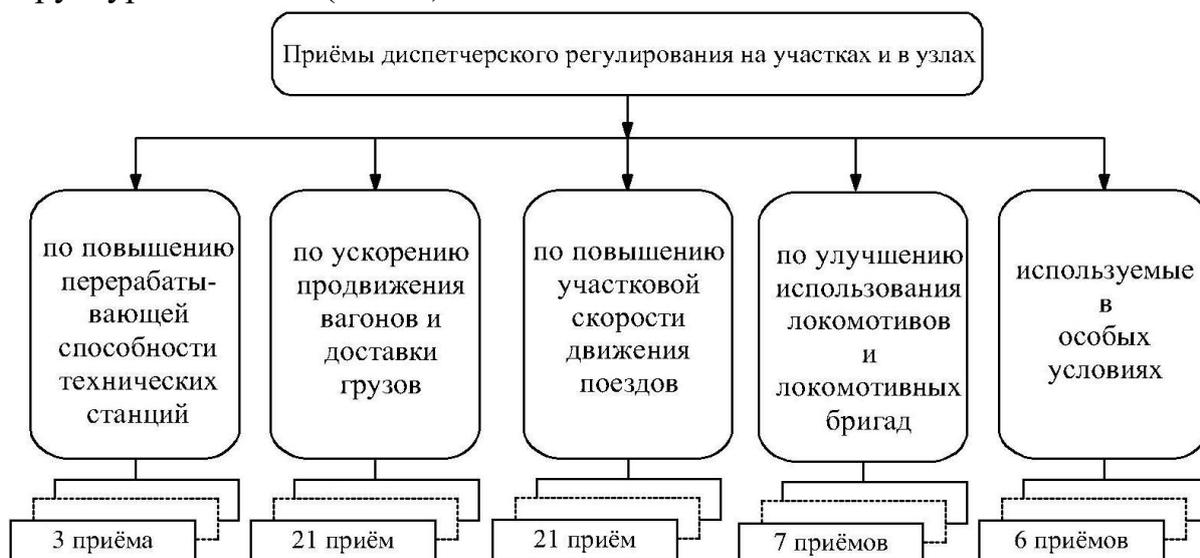


Рис. 2. Классификация диспетчерских регулировочных приёмов 1985 г.

В данной классификации выделены в отдельную группу регулировочные приёмы, имеющие целью улучшение использования локомотивов. Отмечается, что многие приёмы оперативного регулирования, планируемые и осуществляемые поездными участковыми и узловыми диспетчерами для ускорения продвижения вагонов и повышения участковой скорости, одновременно обеспечивают и повышение эффективности использования локомотивов. Также добавлена группа приёмов, используемых в особых условиях. Всего было приведено 58 диспетчерских приёмов.

В результате дальнейших исследований в 1992 г. была создана классификация, включающая 67 диспетчерских приёмов (Рис. 3).



Рис. 3. Классификация диспетчерских регулировочных приёмов 1992 г.

Анализ показал, что в этих классификациях регулировочные приёмы не привязывались к конкретным диспетчерским участкам, с учётом специфики их инфраструктуры.

На основе выполненных исследований, произведённого обзора и анализа многолетней практики диспетчерского регулирования, осуществлена модернизация классификации диспетчерских регулировочных приёмов, применяемых на участках, в узлах и сортировочных станциях.

Предложенная классификация содержит 97 диспетчерских приёмов применяемых и рекомендуемых к применению на участках и в узлах, объединённых в семь групп по принципу ближайшей цели (Рис. 4).



Рис. 4. Современная классификация диспетчерских регулировочных приёмов

В отдельные группы выделены приёмы по совершенствованию организации местной работы и по повышению эффективности использования пропускной и провозной способности. Расширен перечень приёмов по повышению эффективности использования перерабатывающей способности и ритмичности работы технических станций.

В результате исследований определена возможность применения того или иного регулировочного приёма с учетом специфики инфраструктуры железнодорожных участков.

Современный расширенный перечень диспетчерских регулировочных приёмов и результаты анализа их применения опубликованы [18].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования диспетчерского регулирования позволили расширить и модернизировать классификатор диспетчерских регулировочных приёмов, учитывающий два признака их объединения в группы: принцип ближайшей цели и уровень развития инфраструктуры.

Результаты исследований способствуют повышению эффективности диспетчерского регулирования эксплуатационной работы железных дорог.

## Библиографический список / References

1. Грошев Г.М. Оперативное диспетчерское регулирование (Опыт диспетчерских коллективов отделений и дорог). – М.: Транспорт, 1985. – 48 с. [Groshev GM. *Operativnoe dispetcherskoe regulirovanie (Opyt dispetcherskih kollektivov otdelenij i dorog)* Moscow: Transport, 1985. 48 p. (In Russ.)].
2. Barke S, Salka R, Kant M. Dispatching control at the marshalling yard. *Signal und Draht*. 2005;(6):39-41.

3. Ковалев В.И., Осьминин А.Т., Кудрявцев В.А. и др. Управление эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте: учебник в 2 т. – Т. 2. – М.: ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. – 440 с. [Kovalev VI, Os'minin AT, Kudryavcev VA, et al. *Upravlenie ehkspluatacionnoj rabotoj na zheleznodorozhnom transporte: uchebnik v 2 t. T. 2.* Moscow, 2011. 440 p. (In Russ.)].
4. Угрюмов А.К., Грошев Г.М., Кудрявцев В.А., Платонов Г.А. Оперативное управление движением на железнодорожном транспорте. – М.: Транспорт, 1983. – 239 с. [Ugryumov AK, Groshev GM, Kudryavcev VA, Platonov GA. *Operativnoe upravlenie dvizheniem na zheleznodorozhnom transporte* Moscow: Transport, 1983. 239 p. (In Russ.)].
5. Гоголева А.В. Прогноз средней участковой скорости движения грузовых поездов на основе стохастического моделирования: дисс. канд. техн. наук. – Спб., 2012. – 166 с. [Gogoleva AV. *Prognoz srednej uchastkovej skorosti dvizheniya gruzovyh poezdov na osnove stohasticheskogo modelirovaniya.* St. Petersburg, 2012. 166 p. (In Russ.)].
6. Батурин А.П., Шапкин И.Н. Интеллектуализация управления на станционном уровне // Железнодорожный транспорт. – 2012. – №7. – С. 40-43. [Baturin AP, SHapkin IN. *Railway transport.* 2013(4):25-28. (In Russ.)].
7. Куренков П.В., Нехаев М.А. Применение форсайт-технологий для повышения эффективности работы сортировочной станции // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 4. – С. 25–28. [Kurenkov PV, Nekhaev MA. *Railway transport.* 2015;(8):26-32. (In Russ.)].
8. Petros A. *Ioannou Intelligent freight transportation.* CRC Press Publ., 2008. 342 p. ISBN: 13:978-0-8493-0770-6.
9. Campagna A. The Rail and Road Freight Transport in the Co-Modality Approach. In Proceedings of the Workshop on Multimodal Transport and ICT: Result and Recommendations. INTERREG IIIС Project Port-Net. 2006:78-86.
10. Левин Д.Ю., Сухарьков Ю.С. Как повысить эффективность работы поездного диспетчера // Железнодорожный транспорт. – 2007. – №11. – С. 8–14. [Levin DYu, Suhar'kov YuS. *Railway transport.* 2007;(11):8-14 (In Russ.)].
11. Левин Д.Ю. Пути совершенствования работы сортировочных станций / Д.Ю. Левин // Железнодорожный транспорт. – 2015. – №8. – С. 26–32. [Levin DYu. *Railway transport.* 2015;(8):26-32. (In Russ.)].
12. Левин Д.Ю. Технологическая модернизация системы управления перевозками на железнодорожном транспорте: дисс. доктора техн. наук. – М., 2015. – 310 с. [Levin DYu. *Tekhnologicheskaya modernizaciya sistemy upravleniya perevozkami na zheleznodorozhnom transporte: diss. doktora tekhnicheskikh nauk.* Moscow, 2015. 310 p. (In Russ.)].
13. Бадецкий А.П., Бессолицын А.С. Метод выбора очередности ввода поездов в график движения после «окна» // Интеллектуальные системы на транспорте: Сборник материалов четвертой МНПК «Интеллект Транс-2014». – СПб.: ПГУПС, 2013. – С. 372–377. [Badecky AP, Bessolicyn AS. Metod vybora ocherednosti vvoda poezdov v grafik dvizheniya posle «okna» In Sbornik materialov chetvertoj MNPК «Intellect Trans-2014». St.Petersburg: PGUPS, 2014. pp. 372-377. (In Russ.)].
14. Ефанов А.Н., Ковалёнок Т.П., Зайцев А.А. Оценка экономической эффективности инвестиций и инноваций на железнодорожном транспорте: учебное пособие. – СПб.: ПГУПС, 2001. – 149 с. [Efanov AN, Kovalyonok TP, Zajcev AA. *Ocenka*

- ehkonomicheskoy ehffektivnosti investitsij i innovacij na zheleznodorozhnom transporte* St. Petersburg: PGUPS, 2001. 149 p. (In Russ.)].
15. Galvez-Fernandez C, Khadraoui D, Ayed H, Habbas Z, et al. Verteilte Ansatz zur Lösung zeitabhängige Probleme der multimodalen Verkehrsnetze. *Fortschritte in Operations Research*, Hindawi Publishing Corporation, 2009. 15 p.
  16. Srisawat P, Kronprasert N, Arunotayanun K. Development of decision support system for evaluating spatial efficiency of regional transport logistics *Transp. Res.Procedia*, 2017;(25):4832-4851.
  17. Brands T. Multimodal network design and assessment. 11th TRAIL Congress research, November 2010:1-5.
  18. Сугоровский А.В. Метод определения эффективности диспетчерского регулирования на участках, в узлах и сортировочных станциях: дисс. канд. техн. наук. – СПб, 2016. – 181 с. [Sugorovsky AV. *Metod opredeleniya ehffektivnosti dispetcherskogo regulirovaniya na uchastkah, v uzlah i sortirovochnyh stanciyah*. diss. kandidata tekhnicheskikh nauk. St. Petersburg, 2016. 181p. (In Russ.)].

**Сведения об авторах:**

Грошев Геннадий Максимович, доктор технических наук, профессор;  
eLibrary SPIN: 3287-1846; ORCID: 0000-0002-7398-4413;  
E-mail: spbgroshev@gmail.com

Кизляк Олег Петрович, кандидат технических наук, доцент;  
eLibrary SPIN: 8660-2687; ORCID: 0000-0002-4872-9656;  
E-mail: kizlyako@mail.ru

Романова Ирина Юрьевна, кандидат технических наук, доцент;  
eLibrary SPIN: 1365-3598; ORCID: 0000-0002-8027-3054;  
E-mail: romira-spb@mail.ru

Сугоровский Артём Васильевич, кандидат технических наук, доцент;  
eLibrary SPIN: 5575-3221; ORCID: 0000-0001-6955-814X;  
E-mail: c123945@yandex.ru

Кукушкина Яна Васильевна, кандидат технических наук, доцент;  
eLibrary SPIN: 5743-1365; ORCID: 0000-0001-7796-8819;  
E-mail: yana90179@mail.ru

Сугоровский Антон Васильевич, кандидат технических наук, доцент;  
eLibrary SPIN: 6572-5865; ORCID: 0000-0001-5930-1789  
E-mail: gthdsq555@yandex.ru

**Information about authors:**

Gennady M. Groshev, Doctor of technical Sciences, Professor;  
eLibrary SPIN: 3287-1846; ORCID: 0000-0002-7398-4413;  
E-mail: spbgroshev@gmail.com

Oleg P. Kizlyak, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;  
eLibrary SPIN: 8660-2687; ORCID: 0000-0002-4872-9656;  
E-mail: kizlyako@mail.ru

Irina Yu. Romanova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;  
eLibrary SPIN: 1365-3598; ORCID: 0000-0002-8027-3054;  
E-mail: romira-spb@mail.ru

Artyom V. Sugorovsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;  
eLibrary SPIN: 5575-3221; ORCID: 0000-0001-6955-814X;  
E-mail: c123945@yandex.ru

Iana V. Kukushkina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;  
eLibrary SPIN: 5743-1365; ORCID: 0000-0001-7796-8819;  
E-mail: yana90179@mail.ru

Anton V. Sugorovsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;  
eLibrary SPIN: 6572-5865; ORCID: 0000-0001-5930-1789;  
E-mail: gthdsq555@yandex.ru

**Цитировать:**

Грошев Г.М., Сугоровский Ан.В., Сугоровский А.В., Кизляк О.П., и др. Комплексная систематизация и классификация диспетчерских регулировочных приемов // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 63–72. doi: 10.17816/transsyst20195463-72

**To cite this article:**

Groshev GM, Sugorovsky AV, Sugorovsky AnV, Kizliak OP, et al. Modern Systematization and Classification of Dispatch Adjustment Techniques. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):63-72. doi: 10.17816/transsyst20195463-72

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление - Транспортные и транспортно-логистические системы

УДК [UDC] 624.21.037:624.014.2:625.41

DOI 10.17816/transsyst20195473-95

© Н. А. Сенькин<sup>1,2</sup>, А. С. Филимонов<sup>1</sup>, К. Е. Харитонов<sup>1</sup>,  
В. В. Яковлев<sup>1</sup>, Е. О. Бондарева<sup>1</sup>, М. В. Меркулова<sup>1</sup>, Н. Е. Медведев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

(Санкт-Петербург, Россия)

<sup>2</sup>АО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании

Единой Энергетической системы»

(Москва – Санкт-Петербург, Россия)

## К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МАГИСТРАЛИ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

В рамках студенческих исследований в Санкт-Петербургском архитектурно-строительном университете разрабатываются альтернативные предложения по созданию окружной высокоскоростной магистрали (ВСТМ) общей протяженностью 147,2 км. Схема предложена в виде многоугольника с ТПУ в узлах и состоит из трех основных частей: 1 – надземной (62,6 км), 2 – надводной (29,6 км) и 3 - наземно-подземной (55,0 км). Основные пути размещены в четырехтрубной стальной балке, каждая труба которой организована по технологии вакуумного трубного транспорта с давлением 10 % от нормального для высокоскоростного движения пассажирских поездов на магнитно-левитационной подушке при помощи линейного тягового двигателя (технология Maglev). Рельсовое основание колеи 1520 мм расположено по всей длине пути, как на стоянках, зонах разгона и торможения, так и на основных скоростных участках для движения с максимальной скоростью 500 км в час.

Основным направлением исследований явилась разработка несущих конструкций, обеспечивающих необходимую функциональность, надежность и безопасность ВСТМ. В целях снижения шумового воздействия на мегаполис, преодоления многочисленных искусственных и естественных препятствий, повышения антитеррористической защищенности основной уровень рельсового пути для надземной и надводной конструкции принят на отметке +88,00 в Балтийской системе высот. Выполнены расчеты вариантов с определением внутренних сил в элементах и перемещений узлов с использованием программного комплекса “SCAD Office 21.1” при учете полного комплекса нагрузок с учетом динамических воздействий и нелинейности. Выполнен подбор сечений элементов по методике предельных состояний по действующим нормам. Показано преимущество арочно-вантового варианта с пролетом 360 м по прочности, устойчивости, жесткости и вертикальному размеру (высоте опор).

Продолжение научно-исследовательских и проектных работ по данной теме должно привести к появлению окружной высокоскоростной транспортной системы на границах связи Санкт-Петербурга и Ленинградской области с пассажиропотоком, вполне сопоставимым с линией метрополитена.

**Обоснование:** В официальной «Концепции развития транспортной системы Санкт-Петербурга» рассматривается ряд сложных транспортных проблем на границах связи территорий Санкт-Петербурга и Ленинградской области, а именно: недостаточное развитие метрополитена и скоростного трамвая, отсутствие сети транспортно-пересадочных узлов, наличие многочисленных барьеров (железные дороги, парки, реки и каналы и т.п.), исчерпание пропускной способности входных автомагистралей, наличие высокой плотности застройки. На практике проектирование и строительство городских и пригородных автомобильных магистралей в транспортной политике Санкт-Петербурга имеет приоритетное развитие, приводя к дополнительным экологическим потерям.

**Цель:** разработка окружной высокоскоростной транспортной системы на границах связи Санкт-Петербурга и Ленинградской области с пассажиропотоком, сопоставимым с линией метрополитена.

**Материалы и методы:** С использованием программного комплекса "SCAD Office 21.1" рассчитаны эстакадные конструкции на сочетании действующих нагрузок, сил и воздействий, включая учет динамических аспектов и нелинейности, а также выбор сечений элементов методом предельных состояний. Для определения оптимальных эстакадных конструкций скоростных транспортных магистралей, а именно высотных и длинномерных металлоконструкций, поддерживающих балку путепровода, проведены расчеты с подбором поперечных сечений для четырех вариантов вантово-стержневых систем (арочно-вантовая; вантово-стержневая с наклонными вантами и стальными решетчатыми пилонами; то же, со стальными трубобетонными пилонами; вантово-стержневая система с подвесками по патенту US5950543 (A)).

**Результаты:** По результатам вариантного проектирования принят арочно-вантовый вариант с пролетом 360 м по критерию металлоемкости, при этом расход стали составил 20,9 тонн на 1 м длины магистрали. Из приближенного расчета следует, что стоимость строительства магистрали на земных участках (двухпутная схема) по сравнению со строительством метрополитена ожидается в 5-6 раз ниже, а на морских участках – в 3-4 раза ниже за счет высоких пилонов и глубоких свайных фундаментов.

**Заключение:** расчетный объем пассажироперевозок за сутки для четырехпутной высокоскоростной магистрали составит 280 тыс. пассажиров, а в год – 102 млн. пассажиров, который вполне сопоставим с данным показателем для линии метрополитена.

**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 – Transport and Transport & Logistics Systems

© N. A. Senkin<sup>1,2</sup>, A. S. Filimonov<sup>1</sup>, K. E. Kharitonov<sup>1</sup>, V. V. Yakovlev<sup>1</sup>,  
E. O. Bondareva<sup>1</sup>, M. V. Merkulova<sup>1</sup>, N. E. Medvedev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering  
(St. Petersburg, Russia)

<sup>2</sup>JSC "Scientific and Technical Center of the Federal Grid Company  
of the Unified Energy System"  
(Moscow – St. Petersburg, Russia)

## ON THE CREATION OF A HIGH-SPEED TRANSPORT HIGHWAY IN ST. PETERSBURG

As part of student research at the St. Petersburg University of architecture and construction, alternative proposals are being developed for the creation of a circumferential high-speed highway with a total length of 147.2 km. The scheme is proposed in the form of a polygon with HUB in the nodes and consists of three main parts: 1 – above-ground (62.6 km), 2 – above-water (29.6 km) and 3 – surface-underground (55.0 km). The main tracks are located in a four-tube steel beam, each tube of which is organized by the technology of vacuum tube transport with a pressure of 10 % of the normal for high-speed passenger trains on a magnetic levitation cushion using a linear traction motor (Maglev system). The rail base of the 1520 mm gauge is located along the entire length of the track, both in parking lots, acceleration and braking zones, and on the main high-speed sections for movement with a maximum speed of 500 km per hour.

The main direction of research was the development of load-bearing structures that provide the necessary functionality, reliability and safety of structures. In order to reduce the noise impact on the metropolis, overcome numerous artificial and natural obstacles, improve anti-terrorist protection, the main level of the rail track for the above-ground and above-water structures was adopted at +88.00 in the Baltic elevation system. Calculations of variants with determination of internal forces in elements and movements of nodes with use of the program complex "SCAD Office 21.1" are executed, when accounting for the full range of loads taking into account dynamic effects and non-linearity. The selection of cross-sections of elements according to the method of limit states according to the current norms is carried out. The advantage of the arch-cable-stayed variant with a span of 360 m in strength, stability, stiffness and vertical size (height of supports) is shown.

The continuation of research and design work on this topic should lead to the emergence of a district high-speed transport system at the borders of communication between St. Petersburg and the Leningrad region with passenger traffic, quite comparable to the metro line.

**Aim:** To develop a district high-speed transport system at the borders of St. Petersburg and Leningrad region with passenger traffic comparable to the metro line.

**Materials and Methods:** Using the software package "SCAD Office 21.1", the trestle structures are calculated for the combination of operating loads, forces and influences, including the consideration of dynamic aspects and nonlinearity, as well as the selection of cross-sections of elements by the method of limit states. To determine the optimal trestle structures of high-speed highways, namely high-rise and long-length metal structures supporting the overpass beam, calculations with the selection of cross sections of four variants of cable-stayed systems (arch-cable-stayed; cable-stayed rod with inclined cables and steel

lattice pylons; the same, steel pipe-concrete pylons; cable-stayed rod system with suspensions according to the patent US5950543 (A).

**Results:** the results of the trial design adopted arch-cable option with a span of 360 m according to the criterion of metal consumption, the consumption of steel amounted to 20.9 tons per 1 m length of highway.

**Conclusion:** the estimated volume of passenger traffic per day for the four-track high-speed line will be 280 thousand passengers, and 102 million passengers per year, which is quite comparable to this figure for the metro line.

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

## ВВЕДЕНИЕ

Современная Концепция развития пассажирской транспортной системы Санкт-Петербурга, утвержденная постановлением правительства города от 30.06.2014 № 552 «О государственной программе Санкт-Петербурга «Развитие транспортной системы СПб», определяет основные цели и задачи развития [1, 2]. В частности, приведен целый ряд сложных транспортных проблем на границах связи территорий Санкт-Петербурга и Ленинградской области, а именно: недостаточное развитие метрополитена и скоростного трамвая, отсутствие развернутой сети транспортно-пересадочных узлов (ТПУ), наличие множества естественных и искусственных преград (железные дороги, парки, реки и каналы), исчерпание пропускной способности «входных» автомагистралей, наличие высотной плотной застройки и т.п. Указанные проблемы предполагается решить посредством развития двухуровневой транспортной схемы, включающей внеуличную скоростную, преимущественно рельсовую (метрополитен), и подводящую к ней систему наземного городского и пригородного пассажирского транспорта. На практике проектирование и строительство городских и пригородных автомобильных магистралей в транспортной политике Санкт-Петербурга имеет приоритетное развитие (например, Западный и Восточный скоростные диаметры), приводя к дополнительным экологическим потерям [3].

Вышеуказанные проблемы также возникают и по причине формирования городской моноцентрической агломерации вокруг крупного города-ядра, каковым является многомиллионный Санкт-Петербург. В настоящее время отдаление места работы и жительства приводит к росту автомобилизации населения, увеличению транспортных потоков и «запиранию» городских улиц и дорог [4]. С целью решения проблем мегаполиса, приводящих к системному градостроительному кризису, угрожающему экологической безопасности, авторы настоящей статьи предлагают максимально отказаться от использования автотранспорта,

особенно в центральной части Санкт-Петербурга, перейдя на экологически чистый городской электрифицированный скоростной транспорт, преимущественно на основе магнитной левитации [5, 6]. При этом выход видится в дальнейшем повышении скорости и комфортности общественного транспорта, приближении его остановок к станциям метро, минимизации протяженности внутренних переходов, возведении ТПУ и более крупных мультимодальных транспортно-пересадочных комплексов.

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 разработки альтернативных предложений по созданию окружной высокоскоростной транспортной магистрали (ВСТМ), допускающей движение пассажирских электропоездов максимальной скоростью 500 км в час и более с применением технологий Маглев и ЕТТ (Evacuated Tube Transportation) [7–11]. Пусть будет имя поездам «Роса».

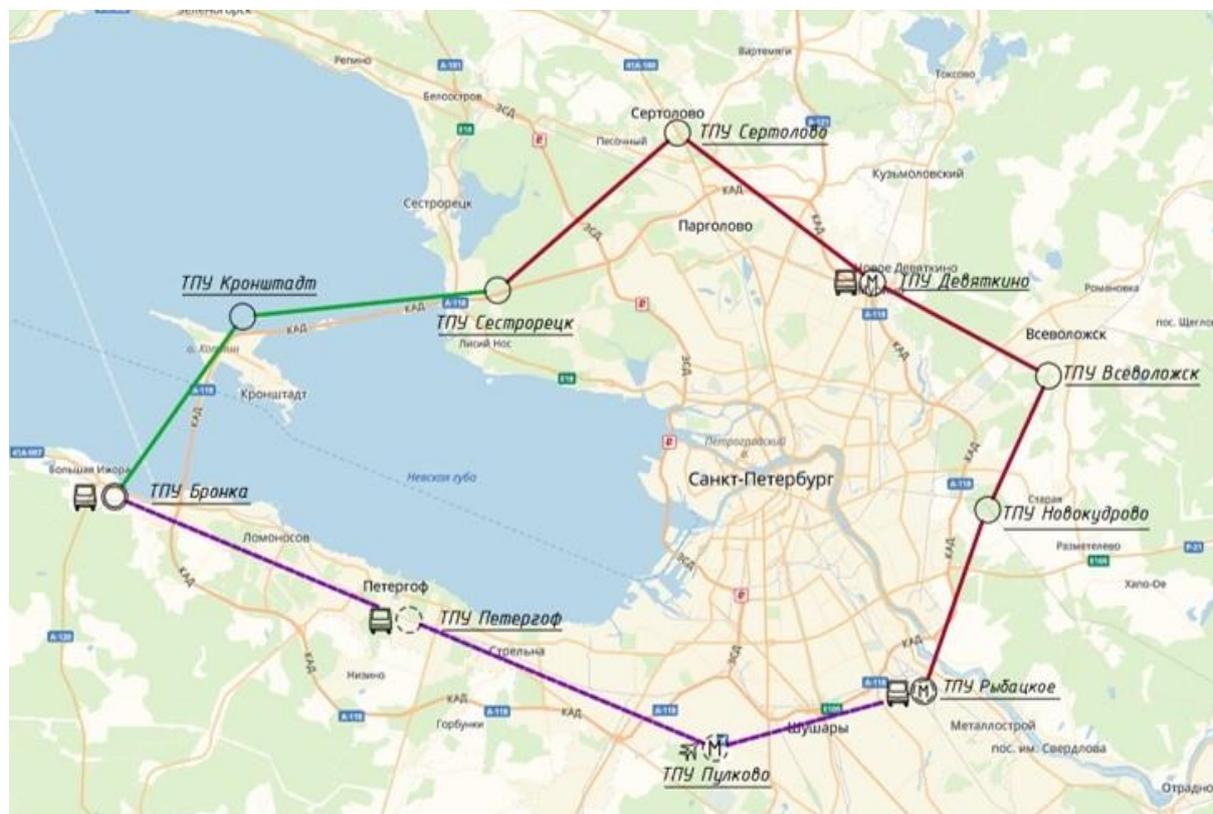
Из многолетнего опыта компании Transrapid по возведению коммерческих пассажирских Маглев-линий известно, что затраты на строительство инфраструктуры могут составить до 60–80 % от общих затрат [12]. Поэтому основным направлением авторских исследований стала разработка схемы ВСТМ, а также конструктивной основы магистрали, в частности высотных и большепролетных несущих конструкций, преимущественно эстакадного исполнения, обеспечивающих требуемую функциональность транспортной системы, надежность конструкций, безопасность для человека и экологии мегаполиса.

## ПРЕДЛАГАЕМАЯ СХЕМА МАГИСТРАЛИ

Общая схема ВСТМ длиной 147,2 км предложена в виде многоугольника с прямыми перегонами, с ТПУ в углах и состоит из трех участков (Рис. 1): 1 – северный надземный «Сестрорецк – Сертолово – Девяткино – Всеволожск – Новокудрино (Янино) – Рыбацкое» (62,6 км), 2 – морской надводный «Бронка (Ижора) – Кронштадт – Сестрорецк» (29,6 км) и 3 – наземно-подземный «Рыбацкое – Пулковое – Петергоф – Бронка (Ижора)» (55,0 км).

Предлагаемая ВСТМ обеспечивает удобные, быстрые и безопасные высокоскоростные транспортные связи мегаполиса с пригородами и близлежащими поселениями Ленобласти. В связи с высотным регламентом и ограничениями со стороны аэропорта «Пулково» в качестве альтернативных вариантов на 3 участке возможно применение высокоскоростных наземных электропоездов (на основе Маглев-технологии) и скоростного трамвая, идущего от станций метрополитена

Рыбацкое и Шушары до аэропорта Пулково. ВСТМ 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.



Условные обозначения:

- |                              |                          |                           |
|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| — Северный (ввод в 2030 г.)  | ○ Надземный ТПУ          | М Станция метрополитена   |
| — Подземный (ввод в 2040 г.) | ○ Подземный ТПУ          | 🚂 Железнодорожная станция |
| — Морской (ввод в 2050 г.)   | ○ Надземно-подземный ТПУ | ✈️ Аэропорт               |

Рис. 1. Предлагаемая высокоскоростная транспортная магистраль в Санкт-Петербурге

Несомненно, предлагаемая схема представляет эскизный вариант организации высокоскоростного пассажирского сообщения, но, тем не менее позволяет ориентировочно оценить его эффективность. Длина каждой транспортной прямой линии между станциями ВСТМ, размещаемыми в ТПУ, принята в интервале 10–22 км, что позволит высокоскоростному поезду «Роса» преодолевать каждый перегон всего за несколько минут. ВСТМ обеспечит высокоскоростное окружное перемещение пассажиров как с севера на юг, так и с запада на восток и обратно, минуя основные транспортные пути мегаполиса и проходя над высотной плотной застройкой. Например, продолжительность переезда от

ТПУ «Сестрорецк» до ТПУ «Рыбацкое», расположенных на схеме диаметрально, составит не более 20 минут.

## ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫЕ УЗЛЫ

Местоположения ТПУ назначены в местах перехвата проходящих из Ленинградской области автомагистралей и в максимальной близости к существующим (Девяткино, Рыбацкое) и перспективным (например, Пулковое, Новокудрово) станциям метрополитена.

Высотное многофункциональное здание ТПУ включает зоны посадки и высадки пассажиров, зоны транзита и ожидания, зоны рекреации и пребывания пассажиров, кассовые, лифтовые и лестничные зоны, санитарно-технические помещения, зоны эскалаторов, траволаторов, переходов и пересадок, зоны связи со станциями и остановками пригородного, городского транспорта, включая метрополитен [8–10]. В таком многоэтажном здании вполне возможным представляется размещение офисных, учебных, гостиничных, спортивных, торговых, культурно-развлекательных, складских и производственных помещений, включая стоянки для автомобилей и даже вертолетов.

Например, здание ТПУ «Кронштадт» запроектировано как многоэтажный небоскреб, обеспечивающий подвеску путепровода на достаточной высоте с отметкой +88,00 БСВ (Балтийская система высот), что гарантирует прохождение над судоходной акваторией Финского залива. Здание расположено на рукотворном полуострове, намытом на Котлинской отмели, огражденном контурной дамбой и примыкающем к острову Котлин и Кольцевой автодороге (КАД) с северо-западной стороны (Рис. 2). Помимо функционала ТПУ территория намывного полуострова благоприятна для размещения объектов отдыха (открытые и закрытые водные комплексы, пляжи, спортивные сооружения), социально-бытовых, транспортно-перегрузочных и зеленых зон и т.п. По высоте здание разделено на следующие функциональные ярусы: нижний с остановками общественного транспорта, автостоянками, кассовыми зонами, лифтовыми площадками; выше до отметки скоростной магистрали - зоны коммунально-бытового, торгового и культурно-просветительского назначения, офисы; выше платформы – офисная и даже жилая зоны [9].

На конструктивной схеме участка ВСТМ, построенной по варианту с применением арочных эстакад, обозначены основные его функциональные компоненты (Рис. 3). Здесь представлено П-образное здание ТПУ «Девяткино», надстраиваемое над существующими совмещенными одноименными железнодорожной станцией и наземной станцией метрополитена [10].

Представленные ТПУ рекомендуется выполнить в виде зданий со стальным либо сталежелезобетонным рамным каркасом с опиранием на трубобетонные сваи-оболочки глубокого заложения.



Рис. 2. Транспортно-пересадочный узел “Кронштадт” на намывном полуострове

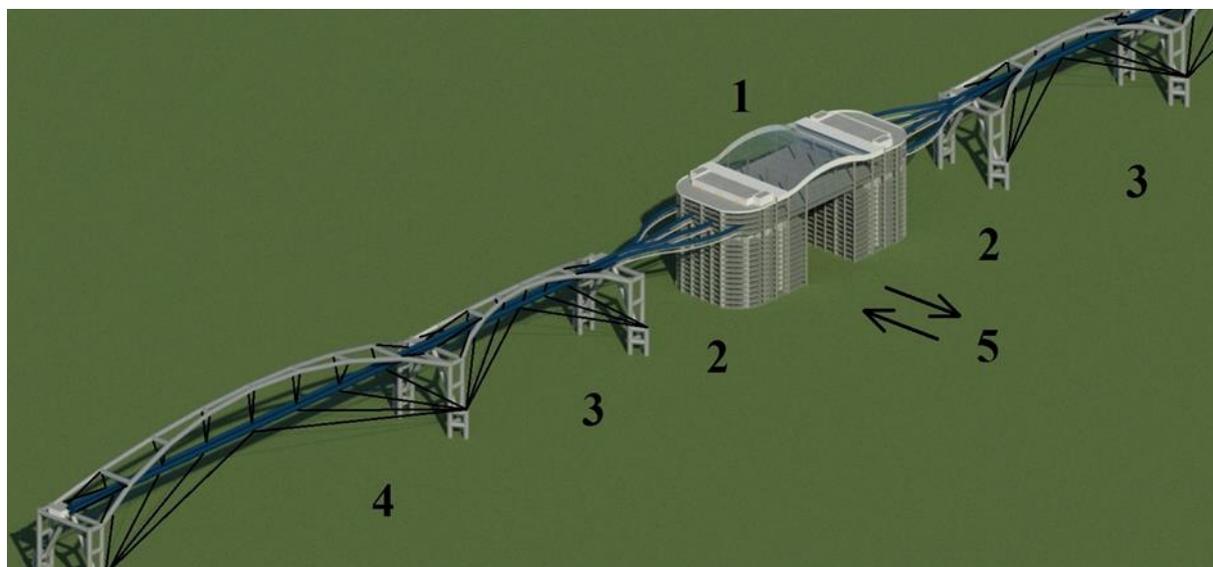


Рис. 3. Основные функциональные зоны высокоскоростной магистрали:

- 1 – здание ТПУ с пассажирскими платформами;
- 2 – зона входа-выхода путепровода;
- 3 – зона остановки состава в путепроводе;
- 4 – зона разгона-торможения состава;
- 5 – направления движения пассажирского городского транспорта

Многоэтажные ТПУ, объединяемые с объектами социальной, сервисной и торгово-развлекательной инфраструктуры, представляют собой архитектурные высотные доминанты в районах мегаполиса. Такие ТПУ, в частности, рассматриваемые в настоящей статье, по определению следует отнести к транспортно-пересадочным комплексам (ТПК), обеспечивающим более высокий уровень комфорта и транспортного обслуживания пассажиров [13].

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МАГИСТРАЛИ

На Рис. 3 представлены основные конструктивные компоненты ВСТМ, относящиеся к следующим функциональным зонам: 1 – зона с платформами для посадки-высадки пассажиров и поворота путей (здание ТПУ); 2 – зона входа-выхода путепровода в здание ТПУ; 3 – зона стоянки состава в путепроводе со шлюзовыми клапанами по концам, снабженная вакуумными насосами и компрессорами; 4 – зона разгона-торможения состава; 5 – направления движения городского и пригородного пассажирского транспорта, включая метрополитен и пригородные поезда. Посредством указанных компонентов обеспечивается работоспособность функциональных зон ВСТМ, характеризующихся как уровнем давления воздуха во внутренней полости труб путепровода, так и соответствующим скоростным режимом движения составов. Путепровод для высокоскоростных поездов “Роса” принимается четырехпутным, включая обратное направление.

Рис. 4 иллюстрирует конструктивно-технологическую схему ВСТМ на прямолинейном участке – перегоне между станциями ТПУ «Девяткино» и ТПУ «Всеволожск» общей протяженностью 12,5 км, так же составленную из большепролетных арочных эстакад, обеспечивающих надежную и безопасную подвеску балки путепровода. Здесь представлен график скоростного движения состава, иллюстрирующий равноускоренный процесс набора скорости  $V$  с ускорением  $a = 4,63 \text{ м/с}^2$  ( $0,47g$ ) в течение 0,5 мин. до максимальной скорости  $V_{max} = 500 \text{ км/ч}$  и аналогично - снижения скорости. При этом протяженность зоны разгона для высокоскоростного варианта составляет 2,1 км и аналогично – зоны торможения. Расчетная продолжительность этапа № 1 (посадка пассажиров в вагоны состава на платформе ТПУ на станции отправления и его перемещения в зону стоянки в трубном путепроводе) назначена равной 0,5 мин., как и продолжительность следующего этапа № 2 (откачка воздуха до требуемого давления в трубе путепровода) – 0,5 мин. Аналогично назначены условия для второго ТПУ (станция прибытия): восстановление атмосферного давления в трубе – 0,5 мин., въезд на платформу в ТПУ и высадка пассажиров – 0,5 мин.

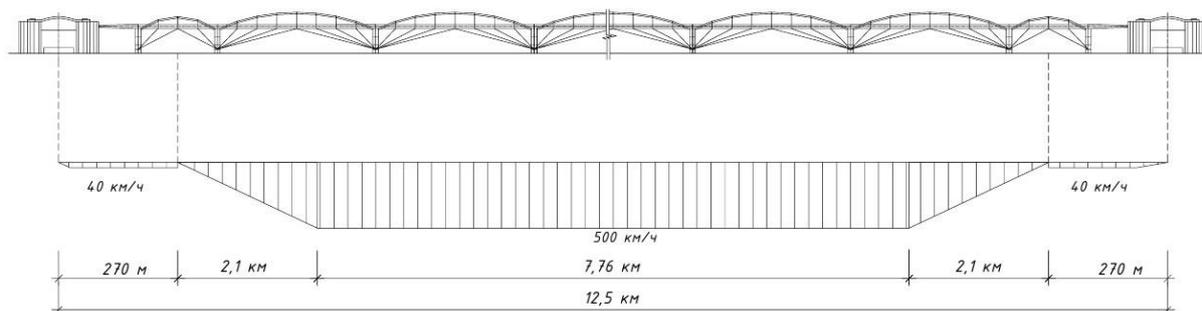


Рис. 4. Конструктивно-технологическая схема магистрали с графиком скоростей

На основе вышеуказанных условий в Табл. 1 представлены результаты вычислений продолжительности проезда на перегонах магистрали для двух вариантов с разными значениями максимальных скоростей  $V_{max}$ . Здесь для скоростного варианта  $V_{max} = 100$  км/ч продолжительность откачки принята 0,3 мин в связи с пониженной степенью вакуумирования до давления 10 % от нормального.

Таблица 1. Продолжительность проезда в ВСТМ для двух вариантов скорости

N	Название станции (ТПУ)	Тип	Расстояние, км		Время проезда при $V_{max} = 500$ км/ч, мин		Время проезда при $V_{max} = 100$ км/ч, мин		
			перегон	итого	перегон	итого	перегон	итого	
1	Сестрорецк	I		62,6		19,67		48,06	
			14,2		4,13		10,62		
2	Сертолово				15,2		4,26		11,22
3	Девяткино				12,5		3,93		9,60
4	Всеволожск				9,7		3,60		7,92
5	Новокудрово (Янино)				11,0		3,75		8,70
6	Рыбацкое	II		55,0		13,88		39,30	
7	Пулково				13,6		4,06		10,26
8	Петергоф				19,2		4,73		13,62
			22,2	5,09	15,42				
9	Ижора (Бронка)	III		29,6		8,41		21,96	
10	Кронштадт				13,6		4,06		10,26
			16,0	4,35	11,70				
11	Сестрорецк								
	Всего:			147,2		41,96		109,32	

Из Табл. 1 следует, что продолжительность проезда существенно зависит от скорости движения поезда в трубе, при этом средняя скорость для высокоскоростного варианта составляет 210,5 км/ч, а для скоростного варианта – 80,8 км/ч. Здесь продолжительность проезда перегонов между станциями для высокоскоростного варианта с максимальной скоростью  $V_{max} = 500$  км/ч не превышает 5 мин, что соответствует привычному и удобному для городского пассажира по продолжительности между остановками в метрополитене. Кроме того, здесь предельное значение ускорения (замедления) принято не превышающим 50 % (0,5g) от ускорения свободного падения  $g$ , что является допустимым для пассажирского транспорта. Известно, что автомобили многих европейских брендов имеют модификации с временем разгона не более 6,0 с до скорости 100 км/ч. Для примера, автомобиль марки “Opel Insignia OPC” достигает скорости 100 км/ч за 6,0 с при ускорении  $4,63 \text{ м/с}^2$  (0,47g), которое принимается для проектирования элементов предлагаемой транспортной магистрали.

Расчетное максимальное количество составов на каждом перегоне на одном пути назначается равным 4 единицам: 3 – в путепроводе (один – на скоростной части и два – в зонах стоянки) и один состав – на платформе в здании ТПУ. Следовательно, общее количество рабочих составов на одном пути ВСТМ составит 40 единиц, не считая резервные, находящиеся на станциях ТПУ с депо (Рис. 1). Пассажирский состав назначается общей длиной 88,0 м из 8 вагонов – модулей с общей вместимостью 64 посадочных места. Таким образом, расчетный объем пассажироперевозок за сутки для четырехпутной магистрали составит 280 тыс. пассажиров, а в год – 102 млн. пассажиров, который вполне сопоставим с данным показателем для линии метрополитена.

## ПУТЕПРОВОД И ПАССАЖИРСКИЙ СОСТАВ

Два необыкновенных технических новшества применены в авторском техническом решении высокоскоростной транспортной магистрали для перемещения состава «без трения»: первое – магнитолевитационная транспортная технология Maglev, реализующая электромагнитную подушку и движение при помощи линейного тягового двигателя [5]; второе – технология ЕТТ (Evacuated Tube Transportation), обеспечивающая вакуумирование внутритрубного пространства до заданного уровня [14–19].

В императорской России первенство в данном исследовании принадлежит профессору Борису Павловичу Вейнбергу, который 31 марта 1914 года в Санкт-Петербурге в публичной лекции «Движение без трения», представил результаты своих лабораторных работ в Томском университете. На этой основе были сформулированы основные принципы

организации движения пассажирского вагона внутри стальной или стеклянной вакуумированной трубы посредством внутреннего и внешнего электромагнитного полей [14]. Из отечественных изобретателей, предложивших наибольшее количество оригинальных технических решений на уровне патентов с вышеуказанными новшествами в начале XXI века, первое место, несомненно, принадлежит ветерану – новатору Н.Р. Янсуфину [15]. Однако, наиболее полные и совершенные технические решения, приемлемые для реального технического внедрения, были запатентованы американским изобретателем Daryl G. Oster в 1999 году [16]. В настоящей истории эти предложения составили техническую основу для разработки вакуумной транспортной технологии с линейным электродвигателем в Китае [5] и США [17].

В своей монографии [17] талантливый инженер и бизнесмен Elon Musk дал описание проектируемой транспортной системы Hyperloop для проезда между Лос-Анжелесом и Сан-Франциско (563 км) за 35 мин., использующей технологию ЕТТ (Evacuated Tube Transportation) для высоких скоростей от 480 до 1220 км/ч с ускорением не более 1,0 g. Пассажирская версия высокоскоростной транспортной системы (ускорение не более 0,5 g), в частности, включает: транспортные капсулы вместимостью на 28 мест, снабженные накопителями электроэнергии, охладителями и компрессорами для создания воздушной подушки вместо электромагнитной; путепровод из двух стальных труб с внутренним давлением 100 Па (почти абсолютный вакуум, в 1000 раз ниже нормального атмосферного давления); линейные асинхронные электродвигатели для перемещения капсул внутри труб; железобетонные опоры для поддержки труб на отметках 6–30 м от земной поверхности, установленные через 30 м по длине магистрали; вакуумное оборудование для обеспечения требуемого давления внутри труб; панели солнечных батарей, размещаемые по поверхности труб. В проекте приняты диаметр трубы 2,23 м, поперечный размер пассажирской капсулы 1,35 м и ее высота 1,10 м, что дает поперечную площадь капсулы 1,4 м<sup>2</sup> и обеспечивает коэффициент заполнения сечения трубы 0,36, определяя 64 % сечения на зазоры. Как пишет автор, такая система в идеале должна представлять собой новый вид транспорта (пятый после самолета, поезда, автомобиля и лодки), который характеризуется как более безопасный, более быстрый, более дешевый, более удобный, независимый от погоды, устойчивый к землетрясениям. Предполагается, что пассажирская версия транспортной системы Hyperloop позволит транспортировать 7,4 миллиона пассажиров в год по каждому пути, затраты на строительство составят 6 миллиардов долларов (менее 9 % от стоимости традиционного высокоскоростного железнодорожного транспорта), стоимость проезда при амортизации за 20 лет составит 20 долларов за поездку в один конец. При этом, добавляет он, в данной разработке пока нет необходимой завершенности в связи с несколькими пока не устраненными фатальными

недостатками, тем не менее это направление является верным решением транспортной проблемы, особенно при высоком трафике городского транспорта [17].

В течение ряда лет в России совместно с исследователями ряда зарубежных стран проводятся исследования по теме высокоскоростного движения и разработке технологии Maglev, которые проводятся учеными ряда научно-исследовательских организаций и высшей школы, прежде всего, в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I под руководством проф. А.А. Зайцева [5]. Большое внимание исследователями уделено разработке отечественной версии транспортной системы Hyperloop [18–20]. Так в большой статье 29-ти авторов “Russia Integrated Transit Transport System (ITTS) Based on Vacuum Magnetic Levitation Transport (VMLT)” [18] предлагается включить тему высокоскоростного атмосферного и вакуумного магнитолевитационного транспорта в «Стратегию развития Российского Федерального Транспорта до 2030».

В настоящей статье авторами предлагается техническое решение, которое характеризуется большей капитальностью, прежде всего повышенной изгибной жесткостью балки путепровода, которая выполнена из 4-х объединенных стальных труб большого диаметра 3020 мм с толщиной стенки 16–30 мм в виде ромба с большей диагональю по вертикали. Между трубами в центре сечения по длине балки расположена продольная коробчатая конструкция с проходом для обслуживания коммуникаций связи, управления и электроснабжения, регулировки предварительного напряжения балки. В каждой трубе устроена рельсовая колея шириной 1520 мм на всём протяжении пути, как на стоянках, в зонах разгона и торможения, так на основных высокоскоростных участках с целью безопасности, например, при отключении электропитания и потере пониженного давления внутри трубы. Пассажирский состав «Роса» из 8 вагонов – модулей общей вместимостью 64 места внешне подобен российскому скоростному «Сапсану», но поперечный размер выполнен более узким почти в 1,5 раза, обеспечен продольный проход с аварийными выходами в первом и последнем вагонах с двухрядной посадкой пассажиров. Цилиндрический модуль изготовлен на основе стальной трубы диаметром 2300 мм с продольным проходом и дверями «крылья чайки», откидываемые вверх при посадке – высадке.

Для данного варианта коэффициент заполнения поперечного сечения трубы составляет 0,59 и на зазоры остается лишь 41 %. Здесь принимается схема не вакуума, а пониженного давления, равного 10 % от нормального атмосферного давления, в связи с ограничением максимальной скорости до  $V_{max} = 500$  км/ч. Причем при последующей корректировке конструкций будет выполнен расчет при более высоком давлении внутри трубы путепровода, равном 50–75 % от нормального. Этот подход соответствует недавним исследованиям в разработке отечественной системы Hyperloop, показавшим, что при такой скорости на создание вакуума тратится больше

энергии, нежели на преодоление сил аэросопротивления в разреженном воздухе. Поэтому предложено как более экономичное понижение давления воздуха в трубе в 1,5–2 раза от нормального, а увеличенное сопротивление движению предложено снизить посредством перфорирования обшивки головной части пассажирской капсулы [19].

## КОНСТРУКЦИИ ТРАНСПОРТНОЙ МАГИСТРАЛИ

Разработка несущих строительных конструкций, обеспечивающих функционирование, требуемую надежность и безопасность ВСТМ также является основным направлением исследования. Как было сказано ранее, основной уровень рельсового пути для наземного и надводного опорного базиса принят на отметке +88,00 БСВ. Далее для выбора оптимального решения конструктивной основы магистрали, а именно высотных и большепролетных несущих конструкций, поддерживающих балку путепровода, выполнены расчеты с подбором сечений четырех вариантов вантово-стержневых систем (ВСС) эстакадной конструктивной схемы (Рис. 5): *a* – арочно-вантовый, *b* – вантово-стержневой с наклонными вантами и решетчатыми колоннами, *c* – то же, с колоннами из трубобетона; *d* – система с вантами-подвесками по патенту Daryl G. Oster [16].

Для учета жесткости пилонов организованы пространственные расчетные блоки, состоящие из трех больших пролетов  $L$ , с нагрузками от составов в центральном пролете. Выполнены расчеты четырех вариантов блоков с определением внутренних усилий в элементах и перемещений узлов с использованием программного пакета SCAD Office 21.1 на сочетании нагрузок и воздействий (статические, динамические, вертикальные и горизонтальные воздействия от собственного веса конструкций, снеговых, ветровых, гололедных нагрузок, пониженного и избыточного давления, нагрузок от подвижного состава, включая продольные нагрузки от его торможения-разгона). Расчетное сочетание нагрузок включало нагрузки от собственного веса конструкции путепровода и временных вертикальных нагрузок от 4-х составов, горизонтальных сил их разгона-торможения, ветрового напора, гололеда и снега. Здесь в расчетах приняты нормативное значение нагрузки от веса четырех поездов 83,4 кН/м и балки путепровода – 10,0 кН/м. В результате найдены абсолютные значения перемещений и усилий при предварительном напряжении несущих и стабилизирующих вант и подвесок, при достижении максимальных амплитуд резонансных колебаний систем от динамической составляющей ветровой нагрузки, включая учет нелинейности [21–23]. Проектирование конструкций транспортной магистрали, включая здания ТПУ, выполнялось по предельным значениям требуемых параметров действующего комплекса нормативно-технической документации (НТД) для конструкций

транспортных и строительных сооружений [24–36], действительных для скоростей движения поездов до 200 км/ч.

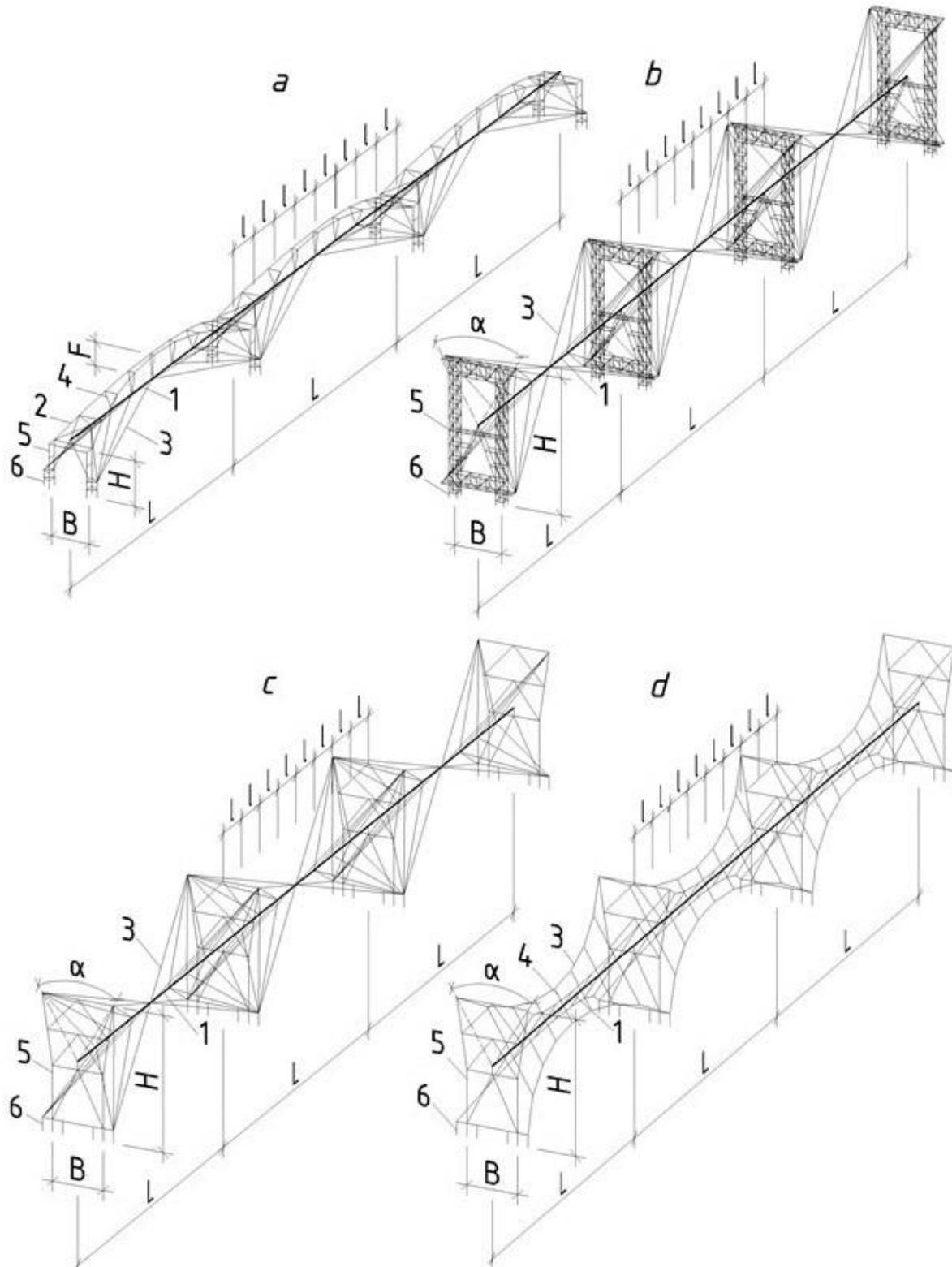


Рис. 5. Пространственные блоки с вариантами конструктивных систем:  
а - арочно-вантовая; б – вантово-стержневая с решетчатыми пилонами;  
с – то же, с трубобетонными пилонами; d - вантово-стержневая с подвесками

На Рис. 5 обозначены буквами:  $\alpha$  – угол между верхними ветвями пилона;  $B$  – ширина пилона в нижней части;  $H$  – высота пилона до земной поверхности;  $L$  – большой пролет несущей конструкции, принятый 360,0 м;  $l$  – пролет балки путепровода, принятый 45,0 м. То же, цифрами: 1 – балка путепровода; 2 – арка; 3 – несущие и стабилизирующие ванты; 4 – гибкие подвески; 5 – двухветвевые пилоны; 6 – заглубленные фундаменты.

Таким образом, для железнодорожных мостов при скоростях до 200 км/ч вертикальные упругие прогибы при действии временной вертикальной нагрузки не должны превышать  $1/(800-1,25L)$  [26] или 1030 мм на большом пролете несущей конструкции  $L = 360,0$  м. Однако в связи с отсутствием специальных технических условий на проектирование сооружений для скоростного и сверхскоростного транспорта предельное значение для прогиба целесообразно назначить равным  $1/600$  от главного пролета  $L$ , как нормируется в нормах по проектированию мостов [26], что дает предельную деформацию или прогиб  $f_u = 600$  мм при  $L = 360$  м. Также движение по рельсам производится в режиме нормальной эксплуатации при разгоне-торможении, а также в аварийном режиме, со скоростью не более 200 км/ч, что в исключительном порядке допускает применимость НТД [26] на этих участках до ввода новых норм [20].

Последний деформационный критерий стал определяющим для выбора оптимальных пролетов  $L$  и  $l$  из следующих серий балок путепроводов 3-трубного и 4-трубного сечений в четырех эстакадных схемах с большими пролетами  $L = 1000$  м, 990 м, 810 м, 630 м и 360 м, составленных из балок пролетами  $l = 90$  и 45 м. Здесь варьировались геометрические параметры вариантов схемы, такие как стрела арки  $F$ , угол между верхними ветвями  $\alpha$  и высота колонн  $H$ . В результате расчета только наименьшие из данных пролетов оказались приемлемыми по прогибам в середине большого и малого пролетов. Окончательно на основании результатов расчета по усилиям и прогибам определен оптимальный вариант – арочно-вантовая система исполнения с пролетами  $L = 360,0$  м,  $l = 45,0$  м и пилонами высотой 81,0 м (Табл. 2).

Арочно-вантовый подвариант с меньшей стрелой  $F = 36$  м оказался менее металлоемким на 1,5 %, нежели подвариант с большей стрелой  $F = 45$  м, требующий материалоемкое обеспечение устойчивости хребтового блока из двух арок из плоскости их плоскости посредством утолщения труб. Аналогично проигрывает выбранному арочно-вантовому варианту самый конкурентный вариант – вантово-стержневая схема с подвесками по причине высокого пилона  $H = 161$  м и повышенного расхода канатной стали в связи с колоссальными усилиями в четырех основных вантах, к которым подвешивается балка путепровода.

По результатам проектирования вычислен ориентировочный расход на все стальные элементы большого пролета  $L = 360$  м, включая пилон, который составил 7527,6 тонн или 20,9 тонн на 1 м длины магистрали. Например, на постройку северного участка высокоскоростной магистрали длиной 62,6 км предполагается израсходовать 1309 килотонн стали.

Таблица 2. Максимальные усилия и прогибы в середине большого пролета  $L$ 

NN	Варианты эстакадных схем несущей конструкции пролётом $L = 360$ м	Параметры			Максимальные усилия и прогибы элементов						
		Арка	Пилон		Балка		Подвеска		Ванты		
		Стрела	Угол между верхними ветвями	Высота	Усилие от нагрузок		Перемещение - прогиб узла	Предварительное напряжение	Усилие от нагрузок	Предварительное напряжение	Усилие от нагрузок
		$F$ , м	$\alpha$	$H$ , м	$M$ , кН·м	$N$ , кН	$f$ , мм	$N_0$ , кН	$S$ , кН	$N_0$ , кН	$S$ , кН
1	Арконо-вантовая система (Рис. 5,а)	36,0	-	81	86413	10778	593	350	4601	330	356
2		45,0	-	81	82482	12211	767	300	4479	200	216
3	ВСС с решетчатыми пилонами (Рис. 5,б)	-	60°	161	121024	17614	770	-	-	3400	5312
4		-	30°	161	119694	18553	791	-	-	3200	5961
5	ВСС с пилонами из трубобетона (Рис. 5,с)	-	60°	161	120000	17263	766	-	-	3300	4740
6		-	30°	161	122563	18066	884	-	-	3100	5570
7	ВСС с подвесками (Рис. 5, d)	-	60°	161	66703	2345	388	30000	32552	-	168082

Из приближенного расчета следует, что расчетная стоимость строительства предлагаемой высокоскоростной магистрали (при двухпутной схеме) на сухопутных участках по сравнению со строительством метрополитена будет ниже в 5–6 раз, а на морских

участках – в 3–4 раза в связи с высокими пилонами и глубокими свайными фундаментами.

В статье на первом этапе разработана универсальная расчетная модель, достоверно отображающая арочно-вантовую конструкцию ВСТМ и позволяющая производить последующие итерационные уточнения с целью сокращения ее металлоемкости и стоимости. Так при продолжении работы на втором этапе предполагается отработать варианты конструкций и путепровода, составленные из четырех труб с диаметрами 3020 мм и 3820 мм при внутреннем разряжении до 50–75 % от атмосферного давления, определить оптимальное значение максимальной скорости  $V_{max}$ , выполнить проект участка ВСТМ для реальных условий мегаполиса с фундаментами на вибропогружаемых сваях и т.д.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На первом этапе разработок предложено предпроектное решение высокоскоростной транспортной системы, устраиваемой на границах связи Санкт-Петербурга и Ленинградской области, при реализации которого для четырехпутной высокоскоростной магистрали расчетный объем пассажироперевозок в сутки может составить 280 тыс. пассажиров, а в год – 102 млн. пассажиров, который вполне сопоставим с данным показателем для линии метрополитена.

2. Высокоскоростная транспортная магистраль, как ожидается, должна обеспечить высокоскоростное окружное перемещение пассажиров как с севера на юг, так и с запада на восток и обратно, минуя основные транспортные пути мегаполиса, преодолевая преграды и проходя над высотной плотной застройкой. Так продолжительность переезда от ТПУ «Сестрорецк» до ТПУ «Рыбацкое», расположенных на схеме диаметрально, составит не более 20 минут.

3. По результатам вариантного проектирования принят арочно-вантовый вариант с пролетом 360 м по критерию металлоемкости, при этом расход стали составил 20,9 тонн на 1 м длины магистрали. Из приближенного расчета следует, что стоимость строительства магистрали на земных участках (двухпутная схема) по сравнению со строительством метрополитена ожидается в 5–6 раз ниже, а на морских участках – в 3–4 раза ниже за счет высоких пилонов и глубоких свайных фундаментов.

4. При продолжении работы на втором этапе предполагается отработать варианты конструкций и путепровода, составленные из четырех труб диаметром 3020 мм и 3820 мм при внутреннем разряжении до 50–75 % от атмосферного давления, следует определить оптимальное значение максимальной скорости  $V_{max}$ , выполнить проект участка ВСТМ для реальных условий мегаполиса с фундаментами на вибропогружаемых сваях и т.д.

**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. Постановление правительства Санкт-Петербурга от 30 июня 2014 года N 552 “О государственной программе Санкт-Петербурга «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга». Режим доступа: [https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c\\_transport/gosudarstvennaya-programma-sankt-peterburga-razvitie-transportnoj-sist/](https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/gosudarstvennaya-programma-sankt-peterburga-razvitie-transportnoj-sist/). Дата обращения: 20.07.2019. [Postanovlenie pravitel'stva Sankt-Peterburga ot 30 iyunya 2014 goda N 552 “O gosudarstvennoj programme Sankt-Peterburga “Razvitie transportnoj sistemy Sankt-Peterburga”. Available from: [https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c\\_transport/gosudarstvennaya-programma-sankt-peterburga-razvitie-transportnoj-sist/](https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/gosudarstvennaya-programma-sankt-peterburga-razvitie-transportnoj-sist/). (In Russ)].
2. Комитет по развитию транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга. «Концепция развития транспортной системы Санкт-Петербурга». Режим доступа: <https://krti.gov.spb.ru/dorozhnyj-kompleks/koncepciya-razvitiya-transportnoj-sistemy-sankt-peterburga/> Дата обращения: 20.07.2019. [Komitet po razvitiyu transportnoj infrastruktury Sankt-Peterburga. “Koncepciya razvitiya transportnoj sistemy Sankt-Peterburga”. Available from: <https://krti.gov.spb.ru/dorozhnyj-kompleks/koncepciya-razvitiya-transportnoj-sistemy-sankt-peterburga/> (In Russ)].
3. Город без автомобилей // Наука и жизнь. – 2019. – № 7 – С. 48–49. [Gorod bez avtomobilej. *Nauka i zhizn'*. 2019;(7):48-49 (In Russ.)].
4. Лаппо Г.М. Города России. Взгляд географа. – М.: Новый хронограф, 2012. – 504 с. [Lappo GM. *Goroda Rossii. Vzglyad geografa*. Moscow: Novyj hronograf, 2012. 504 p. (In Russ.)].
5. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA. *Magnitolevitatsionnaja transportnaja tekhnologija*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 476 p. ISBN 978-5-9221-1540-7 (In Russ.)].
6. Федорова М.В. Скоростной городской транспорт для современной агломерации // Транспортные системы и технологии. – СПб. – 2015. – Вып. 1(1). – С. 26–36. [Fedorova MV. Speed urban transport for modern agglomeration. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(1):26-36. (Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20151126-36
7. 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.)].

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. Mnogofunkcional'nyj transportno-peresadochnyj uzel, vključayushchij vysoko- i sverhskorostnye magistrali // Aktual'nye problemy stroitel'stva. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 70-j Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St-Petersburg: GASU, 2017. Pp. 244-248 (In Russ.)].
9. Яковлев В.В. Предложения по возведению оснований и фундаментов здания ТПУ в районе о.Котлин при реконструкции транспортной системы Санкт-Петербурга / Актуальные проблемы строительства. Материалы 71-й Всероссийской научно-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Санкт-Петербургского госуд. архитектурно-строительного ун-та. Ч.3. СПбГАСУ. – СПб, 2018. – С. 141–145. [Yakovlev VV. Predloženiya po vozvedeniyu osnovanij i fundamentov zdaniya TPU v rajone o.Kotlin pri rekonstrukcii transportnoj sistemy Sankt-Peterburga. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 71-j Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St-Petersburg: GASU, 2018. Pp. 141-145 (In Russ.)].
10. 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, vključayushchij vysokoskorostnuyu magistral'. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 70-j Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St-Petersburg: GASU, 2017. pp. 207-211 (In Russ.)].
11. 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. [Yakunenкова MS. Transportnyj hab kak tip obščestvennogo kompleksa. Funkcional'nye elementy transportnogo haba. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 72-j Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St. Petersburg: GASU, 2019. pp. 185-189 (In Russ.)].
12. Талашкин 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
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. Вейнберг Б.П. Движение без трения. Доступно по: [http://veinberg.o7.ru/pdf/no\\_friction\\_motion.pdf/](http://veinberg.o7.ru/pdf/no_friction_motion.pdf/). Ссылка активна на 15.09.2019. [Veinberg BP. Dvizhenie bez trenya. Available from: [http://veinberg.o7.ru/pdf/no\\_friction\\_motion.pdf/](http://veinberg.o7.ru/pdf/no_friction_motion.pdf/). Accessed September 15, 2019 (In Russ.)].
15. Патент РФ на изобретение RU2327586C2 / 27.06.2008. Бюл. №11. Янсуфин Н.Р. Сверхзвуковая транспортная система Янсуфина [Pat. RUS № 2327586C2 / 27.06.2008. Byul. № 11. Yansufin NR. *Supersonic overland transport system Yansufina* (In Russ.)]. Режим доступа: <http://allpatents.ru/patent/2327586.html> Дата обращения: 15.09.2019.
16. Oster Daryl, inventor. *Evacuated tube transport*. United States patent US5950543 (A). 1999 Sept. 14. Available from: <https://patents.google.com/patent/US5950543A/en>
17. Musk E. Hyperloop 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)
18. 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
19. Kim KK. The Russian Version of the Transport System “Hyperloop”. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):73-91. doi: 10.17816/transsyst20184273-91
20. Plekhanov PA, Shmatchenko VV. Standardization of Maglev Transportation Systems in Russia. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(4):32-43. doi: 10.17816/transsyst2018432-43
21. Металлические конструкции: Спецкурс. Учеб. пособие для вузов / Е.И.Беленя, Н.Н. Стрелецкий, Г.С. Ведеников и др.; Под общ. ред. Е.И. Беленя. – М.: Стройиздат, 1982. – 472 с. [Belenya EI, Streleckij NN, Vedenikov GS, et al. *Metallicheskie konstrukcii: Speckurs. Ucheb. posobie dlya vuzov*. Belenya EI, editor. Moscow: Strojizdat, 1982. 472 p. (In Russ.)].
22. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – Киев: Изд-во «Сталь», 2002. – 600 с. [Perel'muter AV, Sliyker VI. *Raschetnye modeli sooruzhenij i vozmozhnost' ih analiza*. Kiev: Stal', 2002. 600 p. (In Russ.)].
23. Корнеев М.М. Стальные мосты. Теоретическое и практическое пособие по проектированию. – Киев: Вид-во ЗАТ «ВИПОЛ», 2003. – 547 с. [Korneev MM. *Stal'nye mosty. Teoreticheskoe i prakticheskoe posobie po proektirovaniyu*. Kiev: VIPOL, 2003. 547 p. (In Russ.)].
24. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. [SP 16.13330.2017 *Stal'nye konstrukcii*. (In Russ.)].
25. СП 20.13330.2016 Свод правил. Нагрузки и воздействия. [SP 20.13330.2016 *Svod pravil. Nagruzki i vozdeystviy* (In Russ.)].
26. СП 35.13330.2012 Свод правил. Мосты и трубы. [SP 35.13330.2012 *Svod pravil. Mosty i truby*. (In Russ.)].
27. СП 42.13330.2016 Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. [SP 42.13330.2016 *Svod pravil. Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastrojka gorodskih i sel'skih poselenij*. (In Russ.)].
28. СП 46.13330.2012 Свод правил. Мосты и трубы. [SP 46.13330.2012 *Svod pravil. Mosty i truby*. (In Russ.)].
29. СП 113.13330.2012 Свод правил. Стоянки автомобилей. [SP 113.13330.2012 *Svod pravil. Stoyanki avtomobilej*. (In Russ.)].

30. СП 119.13330.2012 Свод правил. Железные дороги колеи 1520 мм. [SP 119.13330.2012 Svod pravil. Zheleznyye dorogi kolei 1520 mm (In Russ.)].
31. СП 120.13330.2012 Метрополитены. [SP 120.13330.2012 Metropoliteny (In Russ.)].
32. СП 259.1325800.2016 Мосты в условиях плотной городской застройки. Правила проектирования. [SP 259.1325800.2016 Mosty v usloviyah plotnoj gorodskoj zastrojki. Pravila proektirovaniya. (In Russ.)].
33. СП 266.1325800.2016 Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. [SP 266.1325800.2016 Konstrukcii stalezhelezobetonnye. Pravila proektirovaniya. (In Russ.)].
34. СП 268.1325800.2016 Транспортные сооружения в сейсмических районах. [SP 268.1325800.2016 Transportnye sooruzheniya v sejsmicheskikh rajonah. (In Russ.)].
35. СП 396.1325800.2018 Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования. [SP 396.1325800.2018 Ulicy i dorogi naseleennyh punktov. Pravila gradostroitel'nogo proektirovaniya. (In Russ.)].
36. ГОСТ 27751-2014. Межгосударственный стандарт. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. [GOST 27751-2014. Mezghosudarstvennyj standart. Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye polozheniya. (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

Филимонов Александр Сергеевич, Бакалавр;  
E-mail: sanya328kms@yandex.ru

Харитонов Кирилл Евгеньевич, Магистр;  
eLibrary SPIN: 6565-0572; ORCID: 0000-0003-0103-6884;  
E-mail: kirillharitonov1994@mail.ru

Яковлев Виталий Вадимович, Магистр;  
eLibrary SPIN: 2214-8713  
E-mail: yakovlev\_v\_13@mail.ru

Бондарева Елизавета Олеговна, Магистр;  
eLibrary SPIN: 4928-7813;  
E-mail: elizavetabond95@gmail.com

Меркулова Марина Владимировна; Магистр;  
eLibrary SPIN: 3616-7543; ORCID: 0000-0003-2541-1546;  
E-mail: kullenish@mail.ru

Медведев Никита Евгеньевич, Магистр;  
E-mail: medved280394@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

Aleksandr S. Filimonov, Bachelor of Science;  
E-mail: sanya328kms@yandex.ru

Kirill E. Kharitonov, Magister of Science;  
eLibrary SPIN: 6565-0572; ORCID: 0000-0003-0103-6884;  
E-mail: kirillharitonov1994@mail.ru

Vitaliy V. Yakovlev, Magister of Science;  
eLibrary SPIN: 2214-8713;  
E-mail: yakovlev\_v\_13@mail.ru

Elizaveta O. Bondareva, Magister of Science;  
eLibrary SPIN: 4928-7813;  
E-mail: elizavetabond95@gmail.com

Marina V. Merkulova, Magister of Science;  
eLibrary SPIN: 3616-7543; ORCID: 0000-0003-2541-1546;  
E-mail: kullenish@mail.ru

Nikita E. Medvedev, Magister of Science;  
E-mail: medved280394@mail.ru

**Цитировать:**

Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Харитонов К.Е., и др. К вопросу создания высокоскоростной транспортной магистрали в Санкт-Петербурге // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 73–95. doi: 10.17816/transsyst20195473-95

**To cite this article:**

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. doi: 10.17816/transsyst20195473-95

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Безопасность на транспорте

УДК [UDC] 550.34.01

DOI 10.17816/transsyst20195496-114

© Г. Н. Антоновская<sup>1</sup>, Н. К. Капустян<sup>1,2</sup>, Ю. С. Ромен<sup>3</sup>, А. В. Данилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова РАН

(Архангельск, Россия)

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

<sup>3</sup>АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (Москва, Россия)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ В ЗАДАЧАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Рассмотрен опыт применения широкополосной сейсмической аппаратуры для выявления изменений в состоянии земляного полотна железнодорожного пути в процессе эксплуатации.

**Цель:** получение экспериментальных обоснований для расширения научных основ геофизических изысканий при мониторинге состояния земляного полотна и выявлении опасных процессов на ранней стадии.

**Материалы и методы:** сейсмические записи, полученные авторами на участке Северной железной дороги. Обработка данных проводилась с применением низкочастотного фильтра ниже 0,5 Гц и анализа траекторий движения точек земляного полотна, выполнялось численное моделирование напряженно-деформированного состояния среды при изменении параметров грунтов, результаты сравнивались с экспериментом.

**Результаты:** Экспериментально и путем численного моделирования показано, что, проводя вблизи железнодорожного пути регистрацию колебаний, создаваемых проходящими поездами, и анализируя изменение амплитуд этих колебаний в низкочастотной области (периоды примерно 100 с), возможно выявить потенциально опасные явления в земляном полотне. Натурные наблюдения показали изменения амплитуд колебаний при сезонном обводнении, результаты согласуются с моделированием. Рассмотрена возможность выявления стадий промерзания-оттаивания грунта и связанных с ними негативных процессов. Путем обсуждения параметров современных аппаратурных средств показаны возможности и применимость разных типов сейсмических датчиков для мониторинга земляного полотна, а также организации интеллектуальной системы мониторинга.

---

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-20-02119 “Разработка технологии сейсмического мониторинга и экспресс-оценка состояния земляного полотна железнодорожных путей в условиях Крайнего Севера и Сибири” и темы НИР лаборатории сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА РАН, № госрегистрации АААА-А18-118012490072-7.

**Заключение:** Доказана возможность использования вибраций от проходящих поездов для выявления изменений в состоянии земляного полотна путем анализа величин амплитуд регистрируемых колебаний. Представлены рекомендации для выбора сейсмодатчиков и организации системы интеллектуального мониторинга состояния земляного полотна.

**Ключевые слова:** широкополосный сейсмометр, земляное полотно железной дороги, мониторинг, подвижный состав, низкочастотное воздействие.

Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Transport Safety

© G. N. Antonovskaya<sup>1</sup>, N. K. Kapustian<sup>1,2</sup>, Yu. S. Romen<sup>3</sup>, A. V. Danilov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research

(Arkhangelsk, Russian Federation)

<sup>2</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences

<sup>3</sup>JSC “VNIIZHT”

(Moscow, Russian Federation)

## THE BROADBAND SEISMIC EQUIPMENT APPLICATION IN PROBLEMS OF ROADBED RAILWAY SMART MONITORING

We present our experience of broadband seismic equipment application to detect changes of roadbed railway state in operation.

**Aim:** to obtain experimental validation to expand the scientific basis of geophysical surveys in roadbed railway state monitoring and identifying hazardous processes at an early stage.

**Methods:** seismic records were obtained by the authors on the Northern railway section. Seismic data were processed using a low-frequency filter of 0.5 Hz and analysis of points movement trajectories of the roadbed railway, we performed numerical modelling of the stress-strain state of the soil when specifying various physical parameters, the results were compared with the experiment.

**Results:** We have shown experimentally and by numerical simulation that by conducting near the railway track vibrations registration formed by passing trains and analyzing the amplitudes change of these vibrations in the low-frequency band (periods of about 100 seconds), it is possible to identify potentially dangerous phenomena in the roadbed. Field observations showed changes in amplitude of oscillations during seasonal flooding; the results are consistent with modeling. The possibility of identifying the stages of freezing-thawing of the soil and associated negative processes is considered. By discussing the parameters of modern seismic equipment, the possibilities and applicability of different types of seismic sensors for roadbed railway monitoring as well as the organization of a smart monitoring system are shown.

**Conclusion:** The possibility of using passing trains vibrations to detect changes of the roadbed railway state by analyzing the amplitudes of these vibrations is proved. Recommendations for seismic sensors choice and organization of smart roadbed state monitoring system are presented.

**Keywords:** broadband seismic equipment, roadbed railway, monitoring, railway train, low-frequency vibration

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее важных вопросов для увеличения грузопотока на участках железных дорог, проложенных в северных регионах, является устранение ограничений по эксплуатации насыпей на слабых основаниях. Большое количество таких насыпей считается потенциально опасными, на многих из них периодически происходят осадки, что вызывает необходимость ограничения скоростей движения поездов. Деформации балластного слоя являются, как правило, следствием осадок слабого основания, в результате чего происходит развитие большого количества дефектов, снижающих устойчивость откосов насыпей и приводящих к уменьшению их несущей способности. В условиях роста объемов перевозок и весовых норм задача совершенствования методов мониторинга и диагностики насыпей на слабых основаниях приобретает первостепенное значение.

Существующие диагностические системы основаны на комплексном применении современных геофизических комплексов, лабораторных методов и компьютерного моделирования [1]. Известно, что подвижный состав является источником вибродинамического воздействия, вследствие чего в земляном полотне создаются дополнительные напряжения и развиваются деформации. Транспортные динамические (вибромеханические) нагрузки изучаются [2], но пока недостаточно данных о поведении грунтов при низкочастотных (ниже 0,5 Гц) нагрузках [3]. Как показали наши натурные наблюдения, именно эти частоты, связанные с прохождением подвижных составов, наиболее интенсивны [4]. Тем не менее, отображение свойств грунтов в волновом поле при низкочастотных воздействиях практически не изучалось, и тут мы видим большие методические возможности для выявления опасных процессов в насыпи.

Как известно, среди геофизических методов сейсмические наблюдения являются наиболее информативными [5]. В частности, сейсморазведка позволяет получать детальные разрезы участков среды, включающих дорожную насыпь, в виде слоисто-блоковой модели с распределением скоростей упругих волн, что дает представление о вещественном составе. Существенным недостатком традиционной сейсморазведки на транспорте является использование в основном кинематических характеристик получаемого волнового поля, т.е. времен вступления волн, для определения их скоростей распространения. Динамические характеристики (спектры, амплитуды и пр.) используются в основном только в нефтегазовой сейсморазведке для уточнения параметров разреза. Еще одной, важной для выявления изменений в среде, особенностью динамики сейсмических волн, в первую очередь амплитуды

колебаний, является так называемая тензочувствительность амплитуды, которая на один-два порядка выше, чем для кинематики [6]. Это свойство амплитуды колебаний, используемое как параметр мониторинга изменений в среде, позволяет существенно раньше, чем при анализе кинематики, заметить изменения в породах, в том числе и опасные для насыпи. Этот вопрос применительно к мониторингу с использованием динамических нагрузок от подвижного состава рассматривается ниже.

Разрезы среды, получаемые структурными методами (например, сейсморазведкой), составляют основу расчетных моделей. Численное моделирование используется сейчас для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) и, в частности, устойчивости насыпи. Компьютерный расчет позволяет рассматривать набор моделей, на основании чего определять мероприятия для укрепления насыпи. При этом практически не используется возможность моделирования изменения НДС насыпи при малых изменениях свойств, например, при сезонных вариациях параметров грунтов. Это, прежде всего, обусловлено тем, что наблюдать такие изменения *in situ* крайне сложно при традиционных методах изысканий.

И, наконец, важным подспорьем для совершенствования сейсмических наблюдений при диагностике и мониторинге земляного полотна железной дороги является современное развитие измерительной техники, способов сбора и передачи данных.

Целью работы является получение экспериментальных обоснований для расширения научных основ геофизических изысканий, в первую очередь, при мониторинге состояния насыпи и выявлении опасных процессов на ранней стадии.

Для достижения поставленной цели предлагается использование комплекса методик, включающих структурные изыскания (в нашем случае малоглубинную сейсморазведку), численное моделирование НДС насыпи, и новый способ, основанный на сейсмической регистрации низкочастотных (периоды 100 с и более) колебаний, возникающих при прохождении железнодорожного состава.

Натурные сейсмические наблюдения по оценке вибрационных воздействий, создаваемых подвижными составами, с применением широкополосной сейсмической аппаратуры выполнялись на участке Северной железной дороги (СЖД) Онежского района Архангельской области в течение двух полевых сезонов. Объектом исследований являлось земляное полотно в районах заторфованных (неблагоприятных) и устойчивых грунтов. Выполнялось компьютерное моделирование различных состояний грунта для оценки достоверности экспериментальных результатов. Согласно СП 11-105-97 [7], территория района отнесена к II категории сложности инженерно-геологических

условий. Участок исследований находится в пределах аккумулятивной равнины озерно-ледникового происхождения приморской низменности. В пределах низменных равнин залегают неоднородные тонкослоистые текучие глинистые водонасыщенные отложения, мощность которых колеблется от нескольких метров до 10 м [8].

## ИНСТРУМЕНТЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

В качестве основных средств измерений колебаний от поезда использовалась широкополосная сейсмическая аппаратура фирмы Nanometrics (Канада): датчик – универсальный сейсмометр Trillium Compact с частотным диапазоном (120 с – 100 Гц), регистратор – Centaur с динамическим диапазоном 142 дБ при 100 отс/с. Подробно о технических характеристиках измерительной аппаратуры можно ознакомиться на сайте официального представителя Nanometrics в России – <https://www.vulcan-inc.ru/>.

Регистрировались вибрации, создаваемые подвижными составами разного типа. Преимущественно, это были товарные поезда с количеством вагонов 50-70 шт., длительность прохождения относительно точки наблюдения составляла 60-100 с.

Первый цикл наблюдений проводился в августе 2017 г., применяли два типа широкополосных сейсмометров, анализ записей которых показал, что вид записей вибраций ниже 0,5 Гц существенно зависит от амплитудно-частотной характеристики датчиков [4], как основные были рекомендованы широкополосные низкочастотные датчики. Второй цикл выполнялся в конце апреля – середине июня 2019 г., на том же участке с указанной выше аппаратурой. Был смонтирован автономный пункт наблюдений с записью данных на флеш-носитель в регистраторе. Оборудование (датчик и регистратор) установлено непосредственно в грунт на глубине 1 м. Горизонтальные компоненты датчика ориентированы поперек (Y, направление на насыпь) и вдоль (X) пути. Электропитание оборудования обеспечено за счет солнечной электростанции. Внешний вид пункта сейсмических наблюдений представлен на Рис. 1а, обратим внимание, что датчик установлен на расстоянии примерно 5 м от оси пути.

В Табл. 1 приведены пиковые значения скоростей смещений грунта при прохождении подвижных составов в разные месяцы по трем взаимно перпендикулярным компонентам, варианты с применением низкочастотного фильтра 0,5 Гц и без него. Видим, что в низкочастотной области, в отличие от исходной записи, наблюдаются повышение значений от апреля к августу по всем компонентам. При этом значения для

интервала апрель-июнь в целом подобны, достаточно резкое отличие по амплитудам наблюдается в августе, что, предположительно может быть связано с изменением физических характеристик грунта.

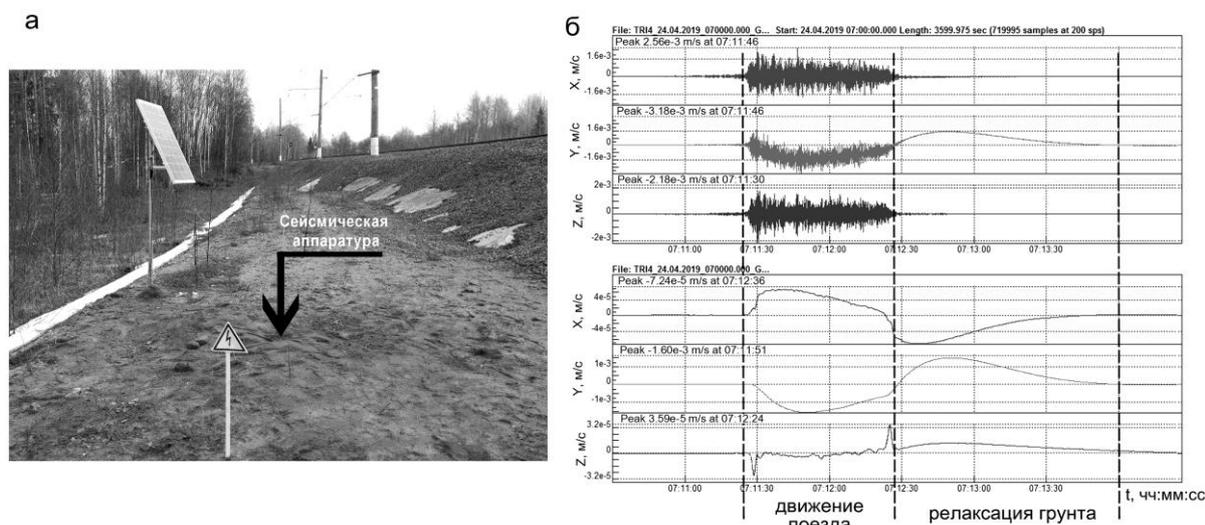


Рис. 1. Автономный пункт сейсмических наблюдений 2019 г. (а), сейсмическая аппаратура находится в грунте, и пример записи подвижного состава по трем взаимно перпендикулярным компонентам (б), где верхние три волновые формы – исходная запись, нижние три – с применением низкочастотного фильтра 0,5 Гц, выделены временные промежутки движения поезда и релаксации грунта после его прохождения

Таблица 1. Значения пиковых скоростей смещений грунта при прохождении подвижного состава

Дата	Пиковые значения скоростей смещений грунта, мм/с					
	Исходная запись			Низкочастотный фильтр 0,5 Гц		
	X	Y	Z	X	Y	Z
24-30 апреля 2019	2,6	3,2	2,2	0,1	1,6	0
1-31 мая 2019	1,9	3,2	1,7	0,1	1,5	0
1-17 июня 2019	1,9	3,2	1,8	0,1	1,4	0
17 августа 2017	1,8	4,1	3,0	0,4	2,5	0,1

Отмеченные различия наиболее ярко проявляются в кривых, соответствующих низкочастотным (периоды около 100 с) составляющим траекторий движения точки насыпи в горизонтальной плоскости при прохождении поездов (Рис. 2). По осям отложены величины скоростей смещений грунта (амплитуды записей), приняты разные масштабы, так как основные по интенсивности колебания происходят в направлении поперек пути (Y). В апреле-июне грунты более водонасыщенные, чем в августе. Сдвиговые деформации во влагонасыщенных средах определяются деформационными свойствами скелета, жидкость не работает на сдвиг, что приводит к меньшим, чем в необводненной среде, величинам сдвиговых деформаций [9]. Учитывая, что велосиметром мы регистрируем амплитуды

скоростей смещений (амплитуды виброскоростей), которые пропорциональны добавочным деформациям в точке регистрации, наблюдаемые нами значения амплитуд в сухой период (август) указывают на большие в это время сдвиговые деформации. Кроме того, построенные кривые за апрель-июнь демонстрируют подобие амплитуд, что можно связать с неизменностью физического состояния земляного полотна.

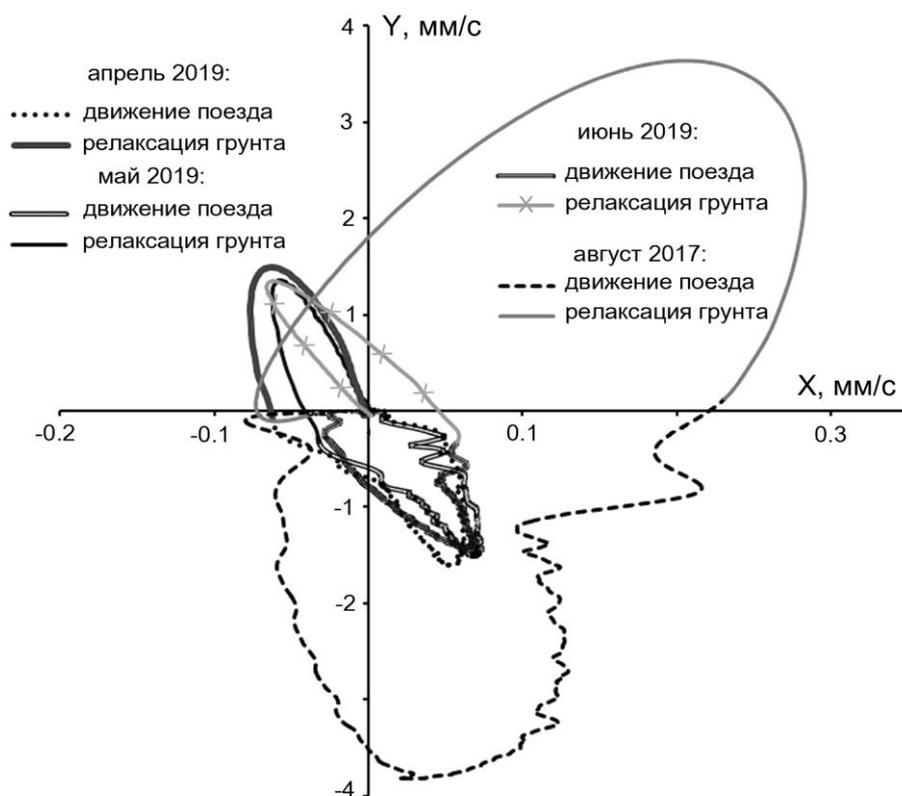


Рис. 2. Кривые, соответствующие траекториям движения точки насыпи в горизонтальной плоскости в разные месяцы при прохождении поездов (полоса частот 120 с – 0.5 Гц)

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ НАСЫПИ

Численное моделирование земляного полотна железной дороги выполнялось с тремя вариантами инженерно-геологических условий (Рис. 3), геометрия слоев и основные параметры задавались по данным малоглубинной сейсморазведки, более подробно результаты приведены в [10]. Расчеты проводились в осесимметричной форме (половина схемы) в статической постановке, что качественно соответствует длиннопериодным колебаниям (период 100 с и более). Численное моделирование выполнено в программном комплексе PLAXIS 2D, работающем на основе метода конечных элементов. В качестве модели грунта использована упругопластическая модель Кулона-Мора, позволяющая выполнять расчет

напряжений и деформаций. Поле напряжений определяется решением двумерной задачи с использованием конечных элементов треугольной формы. Матрица жесткости элементов, которая связывает силы и перемещения в узлах, определяется исходя из минимизации полной потенциальной энергии. Система совместных уравнений, базирующаяся на общей матрице жесткости, решается для перемещения каждого узла. После определения перемещений для каждого элемента определяются напряжения. Таким образом, становятся известными нормальные и касательные напряжения для каждой точки грунтового массива, которые позволяют определить прочность на сдвиг из условия Кулона-Мора:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \quad (1)$$

$$\tau = -\tau_{xy}\cos 2\theta - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\sin 2\theta \quad (2)$$

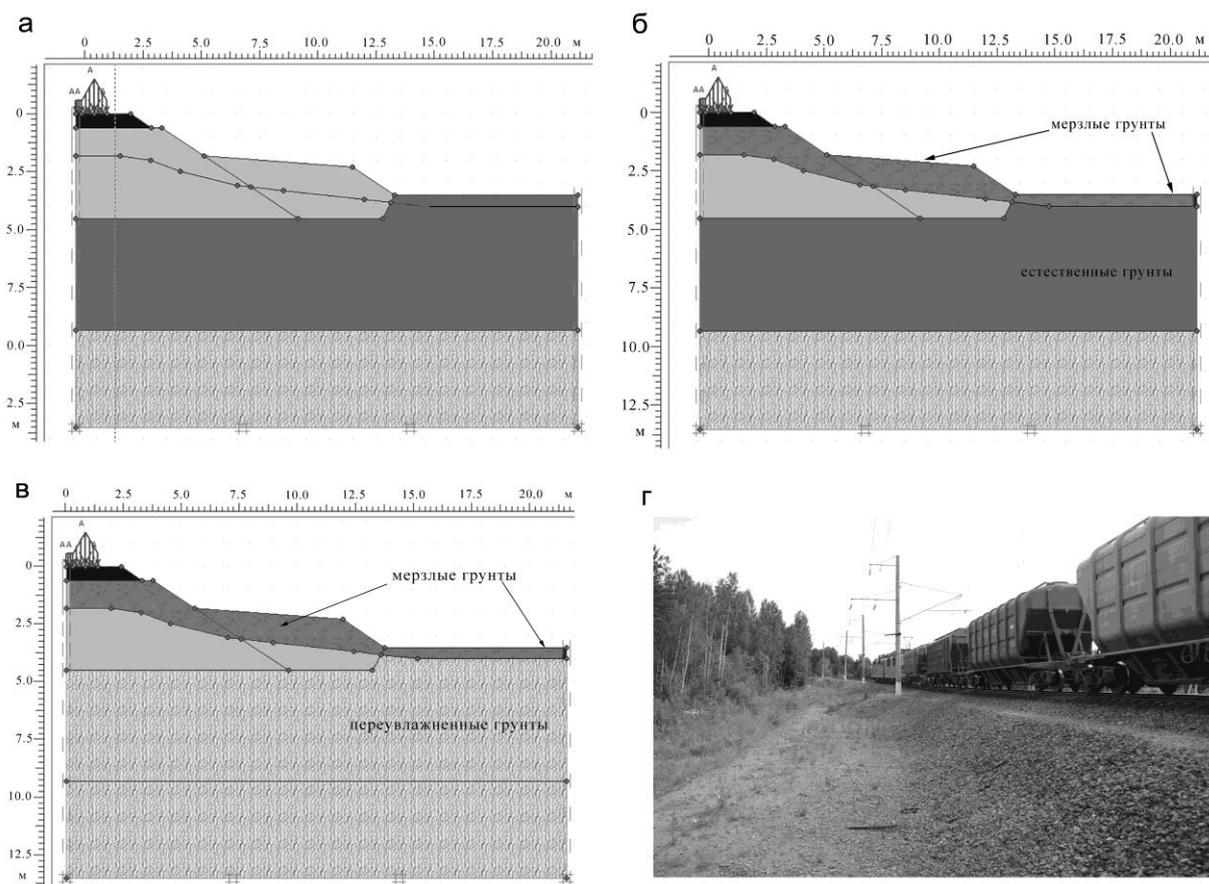


Рис. 3. Варианты расчетных схем, задаваемых для моделирования: а – модель I, грунты в естественном состоянии; б – модель II, глубина промерзания грунта 2 м, ниже грунты в естественном состоянии; в – модель III, глубина промерзания 2 м, ниже грунты в переувлажненном состоянии; г – фото моделируемой насыпи

Вес поезда задавался 40000 т.

Три модели описывают следующие ситуации. Модель I (Рис. 3а) позволяет оценить НДС в различных слоях насыпи, это исходная модель для мониторинга, относительно которой рассматриваются возможные изменения НДС. Модель II (Рис. 3б) – вариант сезонных изменений при зимнем промерзании, модель III (Рис. 3в) – появление обводнения или возможность деградации мерзлых грунтов. Параметры грунтов, задаваемых при моделировании, приведены в Табл. 2, приняты значения параметров, позволяющие получить качественную картину, необходимую в нашей задаче. Разбивка сетки конечных элементов грубая, что позволяет получать результаты расчетов без значительных временных затрат.

Таблица 2. Расчетные характеристики грунтов

Параметры	Модуль упругости, Е, кПа	Удельное сцепление, С, кПа	Угол внутреннего трения $\phi$ , град
Насыпь (мерзлый)	100000	–	–
Насыпь	50000	3	36
Суглинок (мерзлый)	100000	–	–
Суглинок	50000	22	19
Суглинок (увлажненный)	30000	10	12
Гравелистый грунт	100000	4	40

На Рис. 4 показаны результаты расчетов для моделей I-III, описывающие НДС насыпи при движении состава, в частности, в качестве примера – сдвиговые деформации, определяющие зоны, в которых касательные напряжения преобладают над нормальными. Как правило, эти области формируют потенциальные поверхности обрушения, контролируемые расчетами устойчивости. Построение изополей сдвиговых деформаций для разных моделей проводилось в программе Surfer, интерполяция данных осуществлялась с применением кригинга.

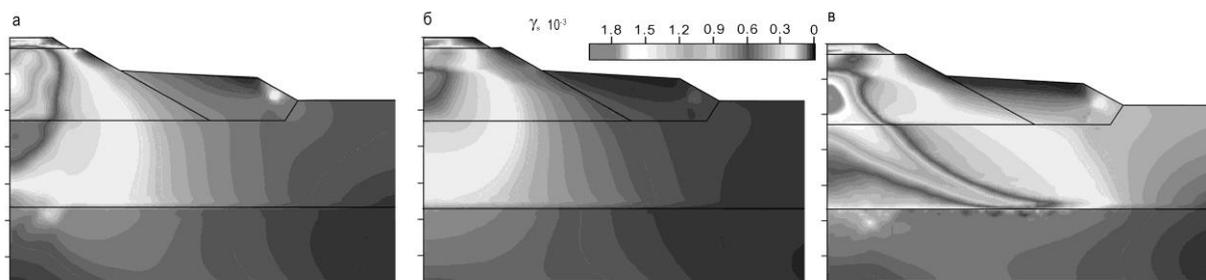


Рис. 4. Изополя сдвиговых деформаций для разных моделей:

- а – модель I, грунты в естественном состоянии;
- б – модель II, глубина промерзания грунта 2 м, ниже грунты в естественном состоянии;
- в – модель III, глубина промерзания 2 м, ниже грунты в переувлажненном состоянии

Видно, что насыпь в естественном состоянии (модель I) характеризуется сдвиговыми деформациями, приуроченными к вертикали, что не грозит горизонтальными подвижками насыпи. При промерзании верхнего слоя (сезонные изменения, модель II) насыпь становится более прочной, что известно на практике. Картина сдвиговых деформаций, представленная для модели III, соответствует неблагоприятному состоянию пути. В сравнении с моделью II это может описывать случай подтаивания мерзлых грунтов. Опасной может быть зона, отходящая вглубь и вбок от оси насыпи. Такая зона, инициируемая движением состава, может стать оползневой. Ситуации, отраженные моделями I и II, достаточно безопасны. Таким образом, численное моделирование с заданием вариаций параметров слоев – это важная составная часть в комплексе методов изысканий, оно способно ориентировать эксплуатационников на возможность опасных явлений.

Рассмотрим вопрос о возможности экспериментального наблюдения эффектов, выявленных при моделировании. В Табл. 3 для некоторых точек насыпи, где теоретически может быть размещено сейсмическое оборудование, приведены значения амплитуд вертикальных вибро смещений, виброскоростей и виброускорений согласно выполненному моделированию для моделей I-III в сравнении с реальными значениями амплитуд виброскоростей в информативном низкочастотном диапазоне. Расчетные значения виброскоростей и виброускорений были получены путем пересчета значений вибро смещений, приняв средний период колебаний за 100 с. Сопоставление результатов компьютерного моделирования и натурных наблюдений, представленных в Табл. 3 (выделено жирным шрифтом), показывает достаточно хорошую сопоставимость данных, т.е. не критично к детальности расчетных моделей.

Таблица 3. Значения амплитуд вертикальных вибро смещений, виброскоростей и виброускорений для моделей I-III в зависимости от места установки датчика в сравнении с экспериментальными значениями амплитуд виброскоростей в диапазоне частот ниже 0,5 Гц

Значения амплитуд:		Подрельсовое пространство (основная площадка)	Основная площадка, глубина 2 м (ниже уровня промерзания)	Берма, основание откоса, глубина 2 м (ниже уровня промерзания)
вертикальных вибро смещений, мм, для моделей	I	7,00	6,50	1,00
	II	4,00	3,50	0,70
	III	9,00	8,00	1,70
вертикальных виброскоростей, мм/с, для моделей	I	0,44	0,41	0,06
	II	0,25	0,22	0,04
	III	0,57	0,50	0,11

Значения амплитуд:		Подрельсовое пространство (основная площадка)	Основная площадка, глубина 2 м (ниже уровня промерзания)	Берма, основание откоса, глубина 2 м (ниже уровня промерзания)
вертикальных ускорений, мм/с <sup>2</sup> , для моделей	I	0,03	0,03	0,004
	II	0,02	0,01	0,003
	III	0,04	0,03	0,007
экспериментальных виброскоростей, мм/с, по компонентам	X	–	–	0,07
	Y	–	–	1,48
	Z	–	–	0,04

Теперь перейдем к вопросу подбора аппаратуры, способной зарегистрировать такие низкочастотные колебания. В Табл. 4 представлены характеристики приборов различного типа, которые, согласно данным технических паспортов, возможно использовать для мониторинга изменения состояния грунтов путем наблюдения их реакции на низкочастотные воздействия при прохождении поезда.

Таблица 4. Технические характеристики приборов сейсмометрических наблюдений

Модель прибора	Акселерометр АС-73	Titan Posthole акселерометр	Сейсмометр Trillium Compact (ТС-120s/ТС-120s Posthole)	Trillium Cascadia сейсмометр + акселерометр	Скважинный деформометр МОЭД-1П
Измеряемая величина / кол-во каналов	Ускорение/3	Ускорение/3	Скорость/3	Скорость/3 и ускорение/3	Смещение/4
Чувствительность	от 2,5 до 20 В/г	от 5 до 80 В/г	750 В с/м	750 В*с/м; от 5 до 80 В/г	–
Диапазон измерений	± 0,5g, 1g, 2g, 3g или 4g	±4 g, ±2 g, ±1 g, ±0,5 g, ±0,25 g, ±0,125 g	0,026 м/с до 10 Гц и 0.17г выше 10 Гц	для акселерометра: ±4 g, ±2 g, ±1 g, ±0,5 g, ±0,25 g, ±0,125 g	0...35 мм
Динамический диапазон	156 дБ (на 1 Гц, RMS)	> 155 дБ (RMS)	>152 дБ на 1 Гц	для сейсмометра: >152 дБ на 1 Гц; для акселерометра >155 дБ	–
Частотный диапазон	0 до 200 Гц	0 до 430 Гц	от 120 с до 108 Гц	для сейсмометра: от 120 с до 108 Гц; для акселерометра: от 0 до 430 Гц	–
Минимально регистрируемый полезный сигнал	6,34E-8 g	7,11E-8 g	6,53E-10 м/с	для сейсмометра: 6,53E-10 м/с для акселерометра: 7,11E-8g	5 мкм
Источник	[11]	[12]	[13, 14]	[15]	[16]

В эксперименте мы использовали широкополосные сейсмометры-велосиметры, линейка которых также приведена в Табл. 4. Весьма перспективным, согласно Табл. 4, является использование форс-балансных акселерометров. Для этой цели было выполнено моделирование акселерограмм в области низкочастотного воздействия подвижного состава путем дифференцирования отфильтрованных записей в программном комплексе GeoDAS (разработка компании GeoSIG, Швейцария). Кроме того, в этом же программном комплексе рассчитаны вибросмещения путем интегрирования этих же записей виброскоростей в низкочастотной области. Для качественного анализа были построены кривые траекторий для виброускорений и вибросмещений для горизонтальных компонент при воздействии поезда за май 2019 г. и август 2017, т.е. тогда, когда были получены явные различия в аналогичных кривых для виброскоростей. Результаты пересчета представлены на Рис. 5, где пунктирными линиями показан участок кривой при движении поезда, а сплошной – в интервале релаксации грунта после прохождения поезда. Это позволяет отчетливо увидеть процесс затухания колебаний в грунте.

Сопоставление кривых, представленных на Рис. 2 и Рис. 5, показывает, что для регистрации низкочастотных колебаний можно использовать любой тип оборудования: скважинные деформометры, сейсмометры и акселерометры. Акселерометры удобнее в эксплуатации и экономичнее, тем не менее, слабые длиннопериодные колебания сейсмометры (велосиметры) регистрируют лучше, в более удобном для анализа виде.

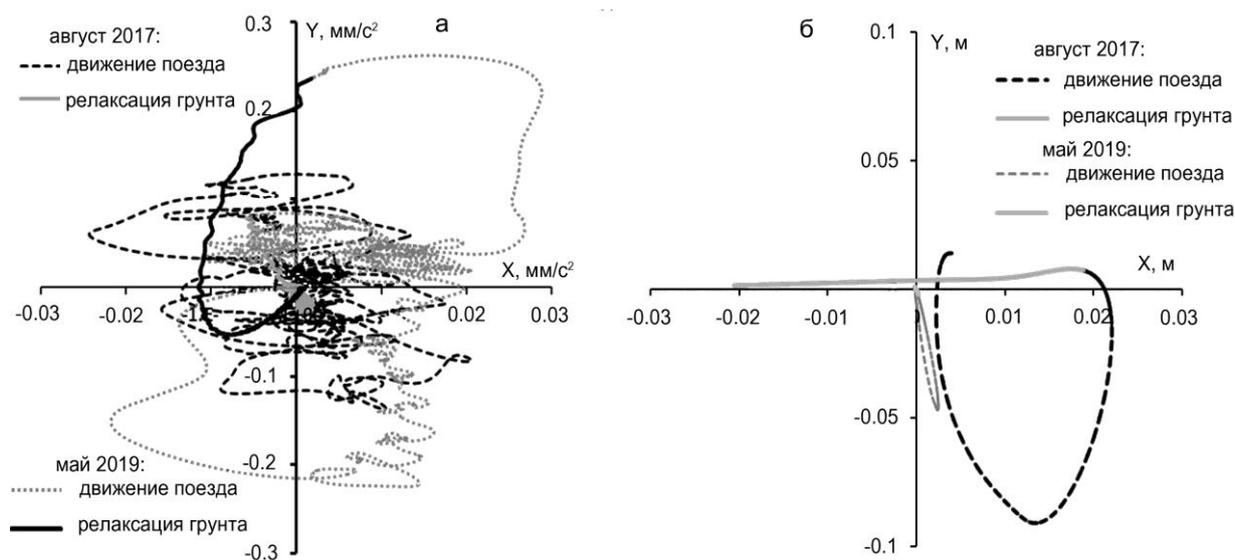


Рис. 5. Кривые, соответствующие траекториям смещения точки насыпи при движении поездов для периодов 120 с – 0,5 Гц в горизонтальной плоскости в разные месяцы – май 2019 г. и август 2017 г. записи:  
а – ускорений, б – смещений

Использование датчиков смещений (скважинных деформометров) для подобных исследований также возможно, но следует учесть большую трудоемкость при установке по сравнению с сейсмическими приборами.

Учитывая современные возможности аппаратуры наблюдений и информационной инфраструктуры, рассмотрим возможность построения систем сейсмического мониторинга для решения задач выявления на ранней стадии негативных природных и природно-техногенных изменений в состоянии железнодорожного полотна и подстилающих грунтов. На Рис. 6 приведена схема предлагаемой системы сейсмического мониторинга, составленная на основе нашего опыта наблюдений, сбора и передачи данных. Такую систему можно назвать интеллектуальной, т.к. она проводит сбор данных, выявляет момент их передачи, взаимодействует с разными устройствами.

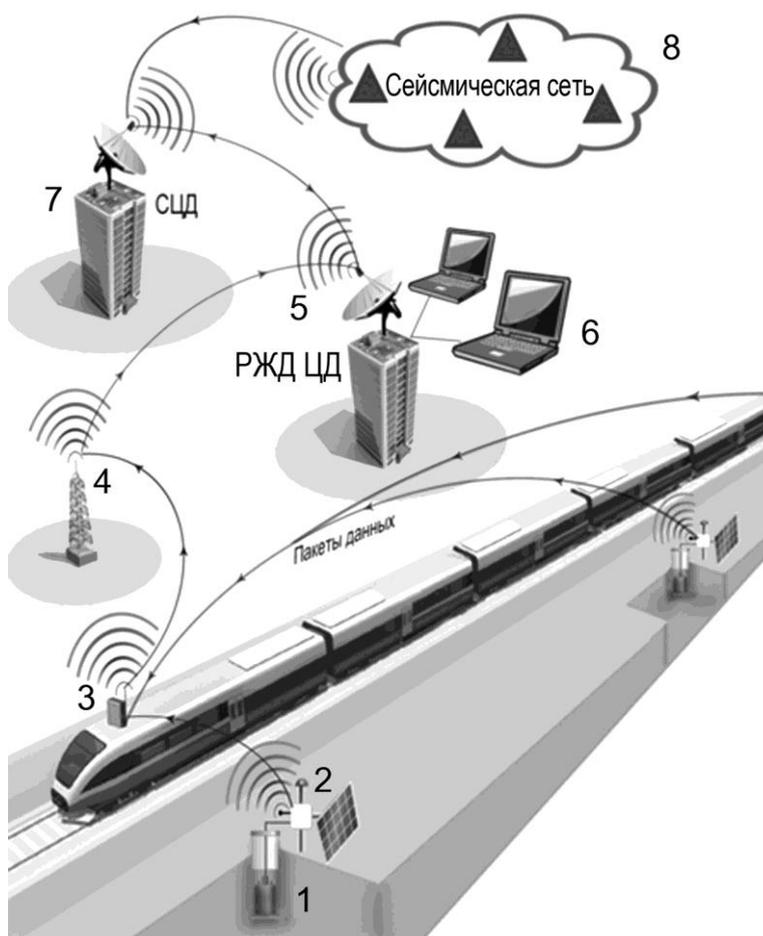


Рис. 6. Схема системы сейсмического мониторинга железнодорожного земляного полотна: 1 – сейсмический датчик; 2 – система электропитания, локального сбора, передачи и хранения сейсмических данных; 3 – система мобильного сбора сейсмических данных (приема-передачи и хранения), установленная внутри поезда; 4 – мачта сотовой связи; 5 – Центр данных РЖД (РЖД ЦД); 6 – автоматическая обработка данных; 7 – Сейсмологический центр данных (СЦД); 8 – региональная сейсмическая сеть, действующая в регионе

Вдоль линий железнодорожного полотна устанавливаются пункты сейсмических наблюдений (1), оснащенные системами электропитания, локального сбора, хранения и передачи данных (2). Шаг расстановки зависит от сложности инженерно-геологических условий района, предполагается сгущение пунктов в более сложных районах (карст, заболоченность, тектонический разлом и пр.), вплоть до установки сейсмических мини групп. Использование аналоговых датчиков при расположенном рядом блоке цифровой регистрации и передачи данных позволяет при необходимости достаточно просто заменять датчик при его поломке или усложнении решаемой задачи. При прохождении состава (пассажирского или грузового), оснащенного системой мобильного сбора сейсмических данных (3), происходит последовательный опрос локальных пунктов сбора во всех точках с использованием в качестве беспроводной связи, например, радиоканала. Далее, при вхождении в зону покрытия сотовой связи (или используя каналы связи РЖД), данные передаются на сервер в центр данных РЖД (5), где происходит их архивация и автоматическая обработка с целью выявления развития опасных процессов, определение уровня опасности участка (6). Кроме того, существует возможность в блоке регистрации заложить алгоритм выделения сигналов, характеризующих опасные процессы (предобработка) с соответствующим реагированием.

Эффективность предлагаемой комплексной технологии достигается сопоставлением натуральных наблюдений с базой данных изменения параметров при наборе ожидаемых опасных процессов в грунтах и моделировании.

При выявлении развития неблагоприятной ситуации при необходимости на участке устанавливается локальная система мониторинга, нацеленная на получение дополнительной информации о состоянии природно-техногенной системы, или проводятся комплексные геофизические исследования. Например, можно дополнительно использовать радиоволновой метод, позволяющий следить за изменением размеров и положением неоднородности и пр. [17].

Использование полноценных датчиков сейсмологического типа позволяет выявлять не только изменение свойств грунтов, но и изменение параметров эндогенного излучения среды с большей глубины (микротресков, слабой сейсмичности и пр.), вплоть до ощутимых землетрясений. Данными возможно обмениваться с региональным сейсмологическим центром данных (7) по сети Internet, который является центральным банком сейсмических данных в регионе (8), тем самым уплотнить наблюдательную сейсмическую сеть.

На Рис. 8 приведен пример регистрации проходящего состава и телесеизмического землетрясения, произошедшего в Папуа-Новая Гвинея

06.05.2019, время в очаге  $t_0=21:19:35$ , широта  $-6,97^\circ$ , долгота  $146,4^\circ$ , магнитуда  $m_b=6,9$ . Для выделения землетрясения использовался фильтр  $0,02-1,4$  Гц. Как видно из Рис. 7, сигнал от поезда на порядок больше по амплитудам колебаний, чем пришедшее землетрясение, но последнее больше по длительности записи (более 20 мин) и отличается по характерной волновой форме. Известно [17], что землетрясения, конечно более сильные, могут вызывать разжижение, течение и проседание грунта, поэтому данные воздействия необходимо включать в систему мониторинга земляного полотна для оценки спектров реакции. Это особенно важно в сейсмоактивных зонах, например, на Байкале, Дальнем Востоке и пр. Отметим, что зарегистрировать оба типа события, достаточно сильно различающихся по параметрам, возможно лишь с использованием широкополосных датчиков и регистраторов с динамическим диапазоном более 140 дБ на 1 Гц.

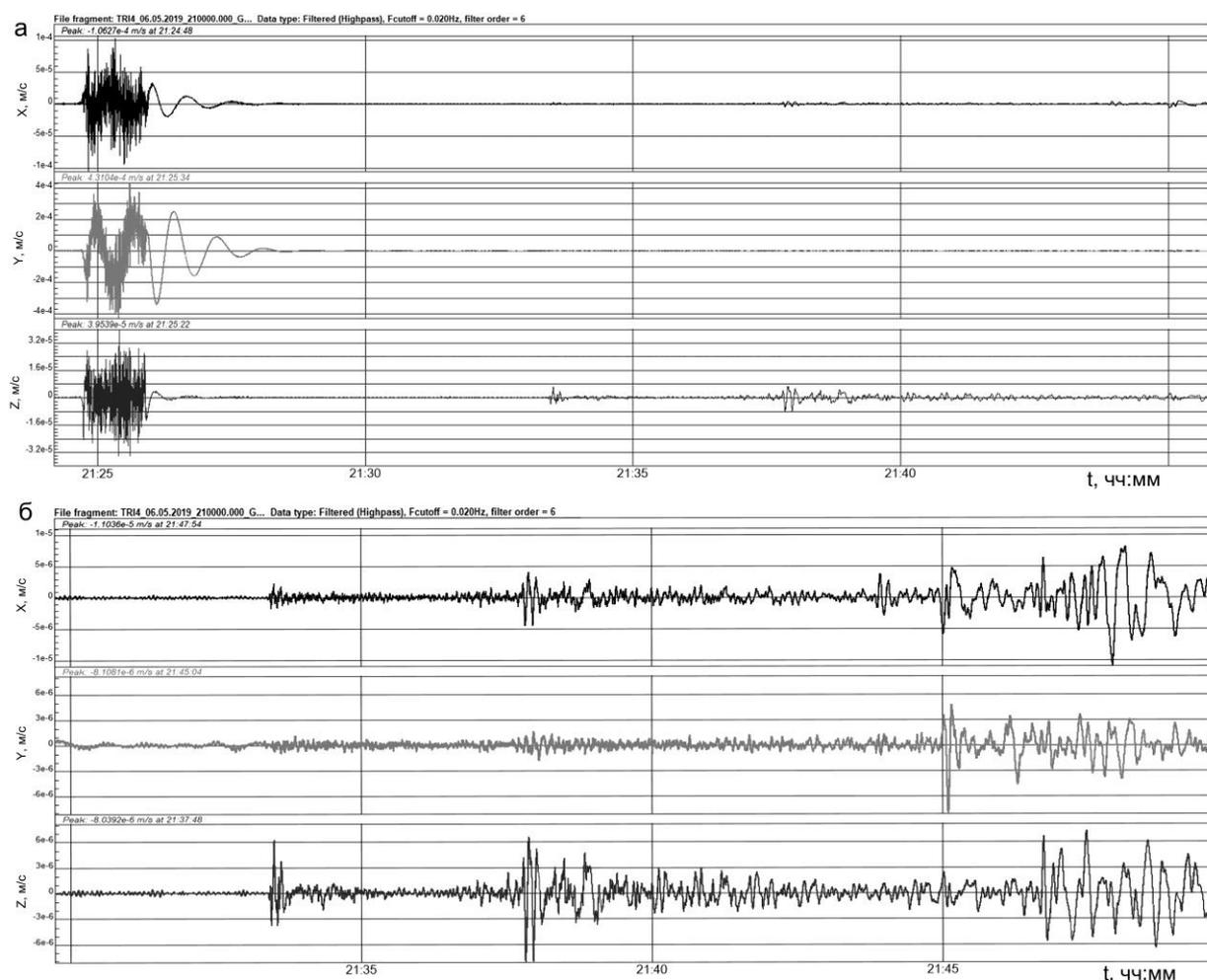


Рис. 7. Пример регистрации телесейсмического землетрясения станцией, расположенной рядом с ж/д линией: Папуа-Новая Гвинея, 06.05.2019,  $t_0=21:19:35$ ,  $m_b=6,9$ , фильтр  $0,02-1,4$  Гц:

а – запись подвижного состава и землетрясения,  
б – волновые формы землетрясения (с увеличением)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены экспериментальные данные и результаты численного моделирования, которые показывают возможности современной сейсмической аппаратуры, методов наблюдения и интерпретации данных в решении задач выявления изменений в грунтах основания железнодорожной насыпи. По существу, получено экспериментальное обоснование для расширения научных основ геофизических изысканий, в первую очередь, при мониторинге состояния насыпи и выявлении опасных процессов на ранней стадии. Важно, что предлагаемый подход в определенной степени закрывает брешь в наборе геофизических методов для непрерывного контроля состояния грунтов оснований пути.

Для этого предлагается использование комплекс методик, включающих структурные изыскания (например, малоглубинную сейморазведку), численное моделирование НДС насыпи, и новый способ, основанный на сейсмической регистрации низкочастотных (периоды 100 с и более) колебаний, возникающих при прохождении железнодорожного состава. Представлена схема интеллектуального мониторинга с разными типами датчиков и сбора и передачи данных. Уверенны, что предлагаемые разработки позволят повысить безопасность на транспорте.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарим сотрудников Северной железной дороги и заместителя главного инженера Северной железной дороги по территориальному управлению С. В. Гаревских за помощь в проведении исследований.

Особую благодарность за создание расчетных моделей выражаем научному консультанту геотехнического отдела ООО«НИП Информатика» кандидату геолого-минералогических наук Е. В. Федоренко.

### 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. Явна В.А., Каспржицкий А.С., Кругликов А.А., Лазоренко Г.И. и др. Этапы проектирования интеллектуальной системы мониторинга объектов транспортной инфраструктуры // Управление большими системами. – 2012. – № 38. – С. 105–120. [Yavna VA, Kasprzhitsky AS, Kruglikov AA, Lazorenko GI, et al. Design stages of intelligent system for transport infrastructure monitoring. *Large-Scale Systems Control*. 2012;(38):105-120. (In Russ.)].

2. Коншин Г.Г. Упругие деформации и вибрации земляного полотна: учеб. пособие. – М.: МИИТ, 2010. – 180 с. [Konshin GG. Elastic deformation and vibration of the roadbed: schoolbook. Moscow: МИИТ; 2010. (In Russ.)].
3. Фуникова В.В. Закономерности динамической устойчивости песчаных и глинистых грунтов (монография). LAP LAMBERT Academic Publishing Saarbrücken, Deutschland, 2011. 199 с. [Funikova VV. *Regularities of dynamic stability of sandy and clay soils* (monograph). LAP LAMBERT Academic Publishing Saarbrücken, Deutschland, 2011. (In Russ.)].
4. Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Данилов А.В. Моделирование состояния нижнего строения железнодорожного пути с применением сейсмических методов // Наука и технологические разработки. – 2018. – Т. 97. – № 1. – С. 35–48. [Kapustian NK, Antonovskaya GN, Basakina IM, Danilov AV. Model Experiment of Railway Track Foundation State Using Seismic Methods. *Science and Technological Developments*. 2018;97(1):35-48. (In Russ.)]. doi: 10.21455/std2018.1-4
5. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. – М.: Наука, 1985. – 408 с. [Riznichenko YuV. *Problemy sejsmologii. Izbrannye trudy*. Moscow: Nauka; 1985. (In Russ.)].
6. Николаев А.В. Проблемы нелинейной сейсмики: сб. статей. – М.: Наука, 1987. – 288 с. [Nikolaev AV. *Problemy nelinejnoj sejsmiki: collected papers*. Moscow: Nauka; 1987. (In Russ.)].
7. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Свод правил. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200000255>. Дата обращения: 06.11.2019. [Code of practice. engineering geological site investigations for construction. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/1200000255>. (In Russ.)].
8. Ключева В.Н., Покровская М.В., Баранов М.И. (Производственное геологическое объединение «Гидроспецгеология», Гидрогеологическая экспедиция 29 района. Архангельский филиал ФБУ «ТФГИ по Северо-Западному федеральному округу»). Инженерно-геологическая съемка масштаба 1:200000. Листы: Р-37-III, IV, X, XI, XII, XVI, XVII. 1984. [Klueva VN, Pokrovskaya MV, Baranov MI. (Production Geological Association “Ggidropspegeologiya”, Hydrogeological expedition 29 district. Arkhangelsk branch of FBU “TFGI in the North-Western Federal district”). Engineering-geological mapping of scale 1:200000. Sheets: P-37-III, IV, X, XI, XII, XVI, XVII. 1984. (In Russ.)].
9. Пьянков С.А., Азизов З.К. Механика грунтов: учеб. пособие. – Ульянов. гос. техн. ун-т. Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 103 с. [Pyankov SA, Azizov ZK. *Mekhanika gruntov: schoolbook*. Ulyanovsk: USTU; 2008. (In Russ.)].
10. Антоновская Г.Н., Афонин Н.Ю., Басакина И.М., Капустян Н.К. и др. Возможности сейсмических методов для оценки состояния земляного полотна железнодорожных путей в условиях Крайнего Севера // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 133–161. [Antonovskaya GN, Afonin NY, Basakina IM, Kapustian NK, et al. Possibilities of seismic methods for the estimation of a railway roadbed state under the conditions of the far north. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(3):133-161. (In Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst201733133-161
11. Форс-балансный акселерометр АС-73/72/71. Доступно по: <https://www.vulcan-inc.ru/index.php/equipment/geosig/ac-73>. Ссылка активна на 06.11.2019. [Force-

- balanced accelerometer AC-73/72/71. [Internet]. [cited 2019 November 6]. Available from: <https://www.vulcan-inc.ru/index.php/equipment/geosig/ac-73> (In Russ.).
12. Titan posthole accelerometer [Internet]. [cited 2019 November 6]. Available from: <https://www.nanometrics.ca/products/accelerometers/titan-posthole-accelerometer>.
  13. Trillium Compact [Internet]. [cited 2019 November 6]. Available from: <https://www.nanometrics.ca/products/seismometers/trillium-compact>.
  14. Trillium Compact Posthole [Internet]. [cited 2019 November 6]. Available from: <https://www.nanometrics.ca/products/seismometers/trillium-compact-posthole>.
  15. Trillium Cascadia [Internet]. [cited 2019 November 6]. Available from: <https://www.nanometrics.ca/products/seismometers/trillium-cascadia>.
  16. Многоканальный оптоэлектронный деформометр продольного типа – МОЭД-1П. Доступно по: <http://www.misd.ru/cooperation/commercial/10133/>. Ссылка активна на 06.11.2019. [Mnogokanal'nyj optoelektronnyj deformometr prodol'nogo tipa – MOED-1P. [Internet]. [cited 2019 November 6]. Available from: <http://www.misd.ru/cooperation/commercial/10133/>. (In Russ.).]
  17. Вознесенский Е.А. Землетрясения и динамика грунтов // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 2. – С. 101–108. [Voznesenskiy EA. Zemletryaseniya i dinamika gruntov. *Sorosovskiy obrazovatel'niy journal*. 1998(2):101-108. (In Russ.).]

**Сведения об авторах:**

Антоновская Галина Николаевна, доктор технических наук;  
адрес: 163000, Архангельск, наб. Северной Двины, 23;  
eLibrary SPIN: 7696-7625; ORCID: 0000-0002-8105-5892;  
E-mail: [essm.ras@gmail.ru](mailto:essm.ras@gmail.ru)

Капустян Наталия Константиновна, доктор физико-математических наук;  
eLibrary SPIN: 8637-6226; ORCID: 0000-0002-3478-2691;  
E-mail: [nkapustian@gmail.com](mailto:nkapustian@gmail.com)

Ромен Юрий Семенович, доктор технических наук;  
eLibrary SPIN: 9426-4849;  
E-mail: [uromen@mail.ru](mailto:uromen@mail.ru)

Данилов Алексей Викторович;  
eLibrary SPIN: 9234-2212; ORCID: 0000-0002-4748-2591;  
E-mail: [danilov.aleksey.vikt@gmail.com](mailto:danilov.aleksey.vikt@gmail.com)

**Information about the authors:**

Galina N. Antonovskaya, Doctor of Technical Sciences;  
eLibrary SPIN: 7696-7625; ORCID: 0000-0002-8105-5892;  
E-mail: [essm.ras@gmail.ru](mailto:essm.ras@gmail.ru)

Natalia N. Kapustian, Doctor of Physical and Mathematical Sciences;  
eLibrary SPIN: 8637-6226; ORCID: 0000-0002-3478-2691;  
E-mail: [nkapustian@gmail.com](mailto:nkapustian@gmail.com)

Yuriy S. Romen, Doctor of Technical Sciences;  
eLibrary SPIN: 9426-4849;  
E-mail: uromen@mail.ru

Alexey V. Danilov;  
eLibrary SPIN: 9234-2212; ORCID: 0000-0002-4748-2591;  
E-mail: danilov.aleksey.vikt@gmail.com

**Цитировать:**

Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Ромен Ю.С., Данилов А.В. Использование широкополосной сейсмической аппаратуры в задачах интеллектуального мониторинга земляного полотна железнодорожного пути // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 96–114. doi: 10.17816/transsyst20195496-114

**To cite this article:**

Antonovskaya GN, Kapustian NK, Romen YuS, Danilov AV. The broadband seismic equipment application in problems of roadbed railway smart monit. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):96-114. doi: 10.17816/transsyst20195496-114

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 629.439

DOI 10.17816/transsyst201954115-123

© Ю. Ф. Антонов

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

## УСТРОЙСТВО ЛЕВИТАЦИИ И БОКОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ НА БАЗЕ ЛЕНТОЧНОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Сверхпроводниковое левитационное устройство содержит стационарный магнитный рельс из постоянных магнитов и криостат на транспортном средстве с размещенным в криостате ленточным высокотемпературным сверхпроводником второго поколения, сложенным стопкой или намотанным катушкой на немагнитный каркас без электрического соединения концов. В охлажденном состоянии ленточный высокотемпературный сверхпроводник второго поколения, сложенный в виде стопки или намотанный на немагнитный каркас в виде осесимметричной или трековой катушки, причем без электрического соединения концов, ведет себя как массивный образец сверхпроводника и, благодаря эффекту Мейсснера-Оксенфельда, магнитное поле, созданное магнитным рельсом, вытесняется из объема сверхпроводника, вследствие чего возникает сила левитации, а транспортное средство зависает над путевой структурой.

Высокие критические параметры ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения обеспечивают сверхпроводниковому левитационному устройству эффективную работу.

**Цель:** Показать техническую возможность и эффективность создания узла левитации на базе использования ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения и постоянных магнитов из редкоземельных металлов.

**Методы:** Расчеты распределения магнитного поля в комбинации магнитный рельс и массивный сверхпроводник, эскизное проектирование узла левитации и экспериментальные исследования на модели.

**Результаты:** Опыты на экспериментальной модели сверхпроводникового левитационного устройства подтвердили работоспособность данного технического решения и его эффективность.

**Заключение:** Предложено оригинальное техническое решение, позволяющее значительно улучшить энергетические характеристики узла левитации за счет применения ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения, работающего в пассивном режиме без транспортного тока, с использованием частичного эффекта Мейсснера-Оксенфельда и зацепления квантованных нитей магнитного потока на центрах пиннинга.

**Ключевые слова:** магнитный рельс, постоянный магнит, ленточный высокотемпературный сверхпроводник второго поколения, левитация, боковая стабилизация.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

© **Yu. F. Antonov**

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

## LEVITATION AND LATERAL STABILIZATION DEVICE BASED ON A SECOND-GENERATION HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR

The superconducting levitation device comprises a stationary magnetic rail of permanent magnets and a cryostat on a vehicle with a second-generation high-temperature tape superconductor placed in the cryostat, folded in a stack or wound by a coil on a non-magnetic frame without electrical connection of the ends and the transport current. Cool tape high-temperature superconductor of the second generation, folded in a stack or wound on a non magnetic frame in the form of axisymmetric or track coil, without electric connections of the ends and a transport current, behaves as a massive sample of a superconductor and the Meissner – Oxenfeld effect, the magnetic field created by the magnetic rail is displaced from the volume of the superconductor, causing the power of levitation and the vehicle hangs over the track structure.

The high critical parameters of the second-generation high-temperature superconductor belt ensure efficient operation of the superconducting levitation device.

**Aim:** To demonstration the technical feasibility and efficiency of creating a levitation unit based on the use of a second-generation high-temperature superconductor and permanent magnets made of rare earth metals.

**Methods:** Calculations of the magnetic field distribution in the combination of a magnetic rail and a massive superconductor, preliminary design of the levitation unit and experimental studies on the model.

**Results:** Experiments on a model of a superconducting levitation device confirmed the efficiency of this technical solution and its effectiveness.

**Conclusion:** an original technical solution is proposed that allows to significantly improve the energy characteristics of the levitation node by using a second-generation high-temperature superconductor operating in a passive mode without a transport current, using the partial Meissner-Oxenfeld effect and the engagement of quantized magnetic flux strands at the pinning centers.

**Keywords:** magnetic rail, permanent magnet, tape high-temperature superconductor of the second generation, levitation, lateral stabilization.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известно сверхпроводниковое магнитостатическое левитационное устройство, примененное в проекте «Кобра» [1]. Данное устройство содержит магнитный рельс в виде набора полюсов из постоянных магнитов, расположенных стационарно на путевой структуре, и криостатов

на борту транспортного средства. В криостатах размещены массивные сверхпроводниковые образцы из иттриевой керамики ІВСО.

При заливке в криостаты криогенной жидкости массивные образцы из иттриевой керамики переходят в сверхпроводящее состояние и, как следствие, магнитное поле, создаваемое магнитным рельсом, выталкивается из объема образцов иттриевой керамики ІВСО, благодаря эффекту Мейсснера-Оксенфельда. В результате возникает сила левитации и транспортное средство зависает над путевой структурой. Часть магнитного поля, создаваемого магнитным рельсом, проникает в объем образцов иттриевой керамики ІВСО, благодаря магнитометрическому коэффициенту размагничивания, присущему макроскопическому телу любой формы и размера. Проникшее в образец магнитное поле закрепляется на центрах пиннинга, вследствие чего левитационное устройство приобретает устойчивость.

Это техническое решение мало эффективно, поскольку иттриевая керамика, как высокотемпературный сверхпроводник, имеет недостаточно высокие критические параметры по току и магнитному полю, которые взаимосвязаны, в сравнении, например, с ленточными высокотемпературными сверхпроводниками (ВТСП) второго поколения.

Задача состоит в описании нового технического решения узла левитации и боковой стабилизации и обосновании его эффективной работы.

## **МАГНИТОСТАТИЧЕСКОЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЕ ЛЕВИТАЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО: КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ**

Повышение эффективности сверхпроводникового левитационного устройства возможно за счет применения ВТСП с более высокими критическими параметрами. В настоящее время налажено промышленное производство ленточных ВТСП второго поколения с достаточно высокими критическими параметрами, в том числе при температуре жидкого азота.

Опыт показывает, что в устройстве левитации нецелесообразно использовать магнитную систему, намотанную из ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения (2G ВТСП) в виде катушки, с заведенным в катушку током, поскольку левитационное устройство работает неустойчиво, согласно теореме Ирншоу [2]. Рациональным решением является изготовление из ленточного 2G ВТСП стопки, которая помещается в коробку из немагнитного материала, а коробка закрепляется на внутренней стенке криостата. Стопка ленточного 2G ВТСП может быть ориентирована по отношению к магнитному рельсу

плоскими сторонами параллельно или перпендикулярно. Перпендикулярная ориентация предпочтительнее с учетом специфики проникновения внешнего, создаваемого магнитным рельсом (Рис. 1), магнитного поля в сверхпроводник. Наиболее технологичный способ укладки ленточного 2G ВТСП реализуется путем намотки ленты на немагнитный каркас в виде осесимметричной или трековой катушки, причем концы катушки электрически не соединены.

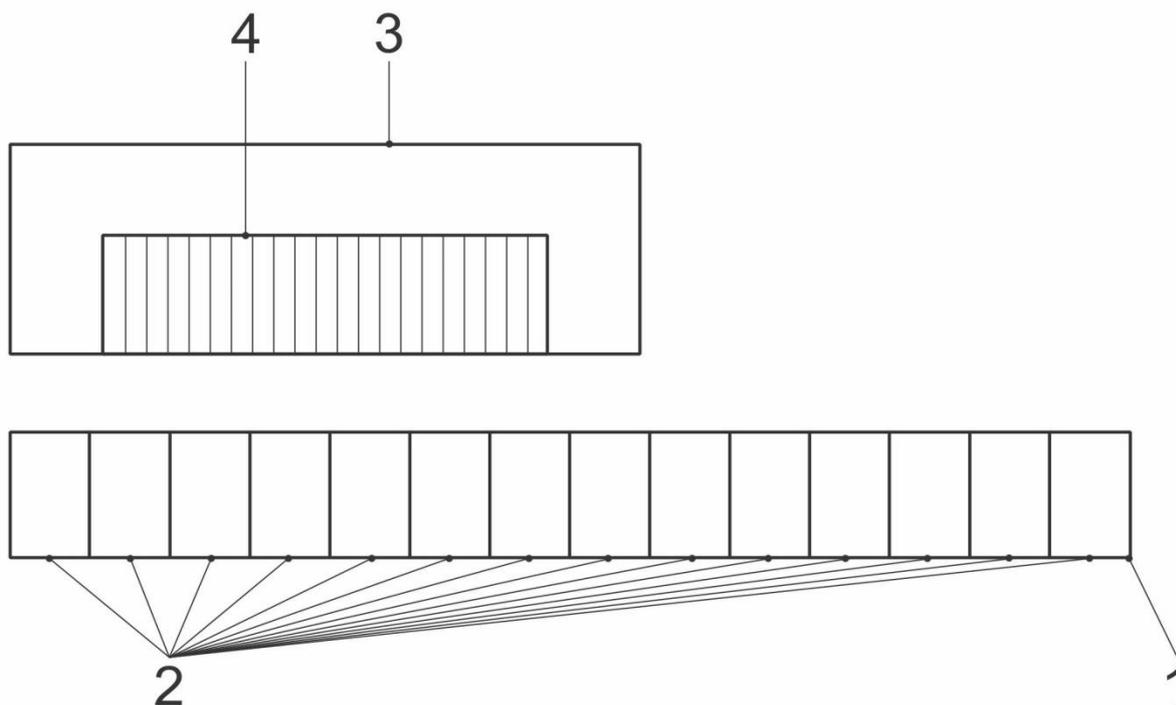


Рис. 1. Схема сверхпроводникового магнитоэвистического левитационного устройства:

- 1 – магнитный рельс;
- 2 – постоянные магниты;
- 3 – криостат;
- 4 – стопка из ленточного 2G ВТСП

## МОДЕЛЬ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ЛЕВИТАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА

Модельная установка состоит из магнитного рельса и платформы на базе криостата с массивным ленточным 2G ВТСП, охлаждаемым жидким азотом. Для исследования левитации и боковой стабилизации платформы с использованием 2G ВТСП выбрана оптимальная по массогабаритным и

экономическим показателям схема сборки магнитного рельса с периодическим изменением полярности модульных магнитов в поперечном (боковом) направлении. Блок магнитного рельса (Рис. 1) имеет габариты 0,5 x 0,5 м. Он состоит из 15 модульных магнитов, представляющих собой тонкостенные (1,5 мм) трубы из нержавеющей стали с установленными в них десятью элементарными магнитами NdFeB с габаритами 46×46×46 мм. Для эксперимента выбраны магниты марки N35U, которые имеют следующие параметры: остаточная индукция 1,17 Тл, коэрцитивная сила по индукции 868 кА/м, коэрцитивная сила по намагниченности 955 кА/м, энергетическое произведение (ВН) max 263 кДж/м<sup>3</sup>. Масса элементарного магнита 1 кг. Модульные магниты расположены в пазах зубчатого ферромагнитного сердечника попарно так, что магнитные моменты элементарных магнитов соседних модулей направлены горизонтально и встречно. Блок магнитного рельса с вариантом сборки магнитов в пазы ферромагнитного зубчатого сердечника (Рис. 2) незначительно уступает варианту сборки по схеме Хальбаха без ферромагнитного зубчатого сердечника по значению магнитной индукции в левитационном зазоре, однако превосходит в экономии потребного количества элементарных постоянных магнитов. Массивный 2G ВТСП представляет собой осесимметричную катушку из 2G ВТСП производства компании Super Power на немагнитном каркасе (Рис. 3). Толщина ленты 0,1 мм, ширина 4 мм. Критический ток 150 А.

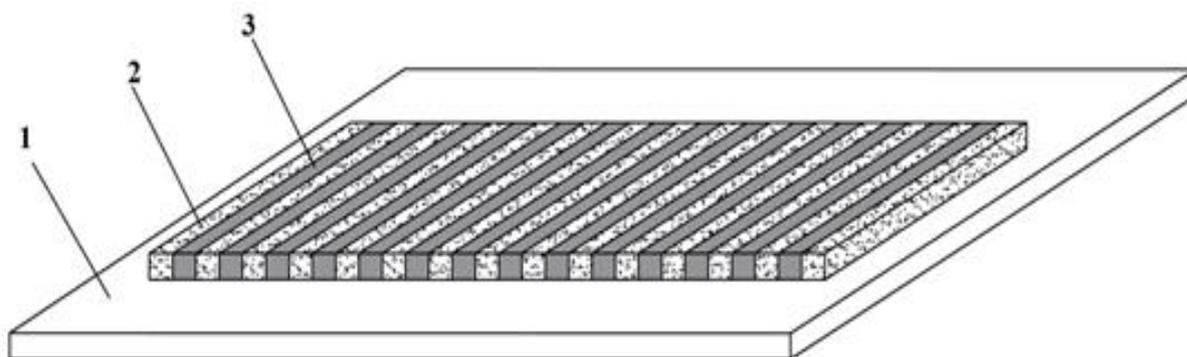


Рис. 2. Блок магнитного рельса с вариантом сборки магнитов в пазы ферромагнитного зубчатого сердечника:

- 1 – плита Ст. 3 ( $s=50$ );
- 2 – пруток Ст. 3 (50x50x500 мм);
- 3 – магниты NdFeB 46x46x46 мм  
15 шт. в трубе X18H10T

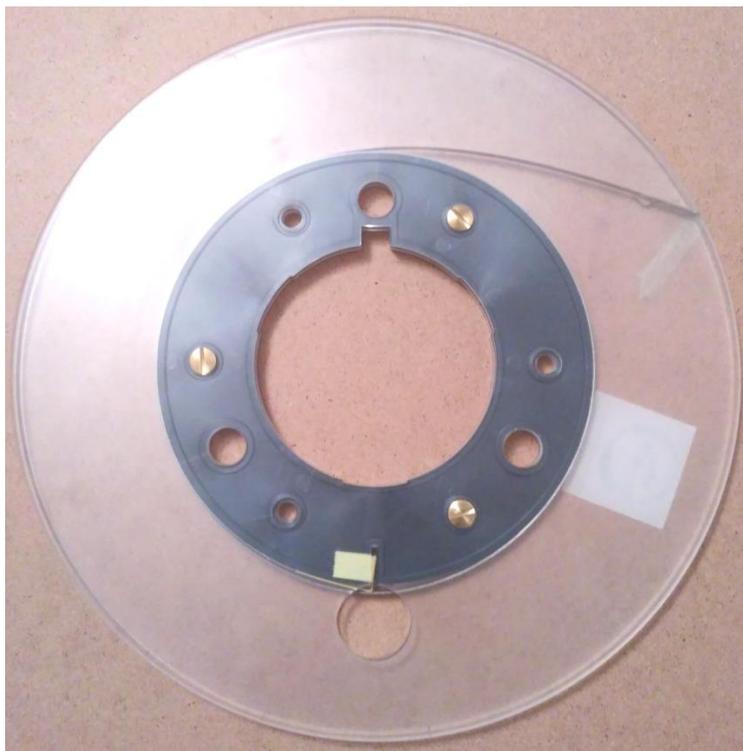


Рис. 3. 2G ВТСП лента компании Super Power  
ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения

Сверхпроводниковое левитационное устройство работает следующим образом. Вначале производится захолаживание путем, например, заливки в криостат криогенной жидкости, в частности, жидкого азота. Во время работы сверхпроводникового левитационного устройства обеспечивается его непрерывное криостатирование. Поскольку в охлажденном состоянии ленточный высокотемпературный сверхпроводник второго поколения проявляет сверхпроводящие свойства, то, благодаря эффекту Мейсснера-Оксенфельда, магнитное поле, созданное магнитным рельсом, вытесняется из объема сверхпроводника и возникает сила левитации, а транспортное средство зависает над путевой структурой. Вследствие более высоких критических параметров ленточного 2G ВТСП, в сравнении с иттриевой металлокерамикой, предлагаемое сверхпроводниковое левитационное устройство работает эффективнее, чем в проекте «Кобра».

Ленточный 2G ВТСП более технологично наматывать на немагнитный каркас в виде осесимметричной или трековой катушки без электрического соединения концов (Рис. 3). Такая конструкция будет работать как массивная стопка, но более эффективно, поскольку с помощью натяга можно добиться высокого коэффициента по намотке.

Эксперименты с моделью [3] сверхпроводникового левитационного устройства показали следующие результаты (Рис. 5):

- удельная подъемная сила левитации, отнесенная к массе сверхпроводниковой стопки или катушки, составляет  $100 \text{ кН/м}^3$ ;
- боковая сила стабилизации соответственно  $45 \text{ кН/м}^3$ .

Эксперименты подтверждают, что данное техническое решение является перспективным для внедрения на магнитолевитационном транспортном средстве с магнитоэлектростатической левитацией.

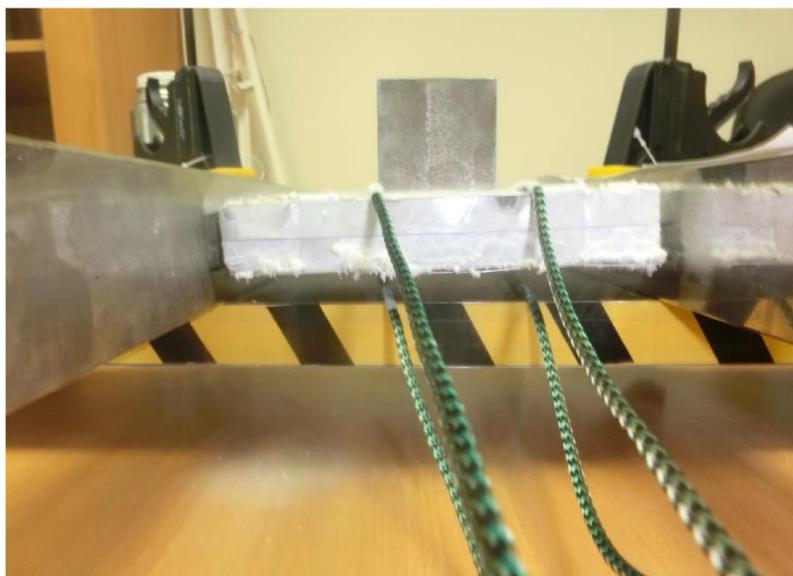


Рис. 4. Демонстрация левитационного зазора под нагрузкой (веревки применяются для испытания боковой устойчивости)

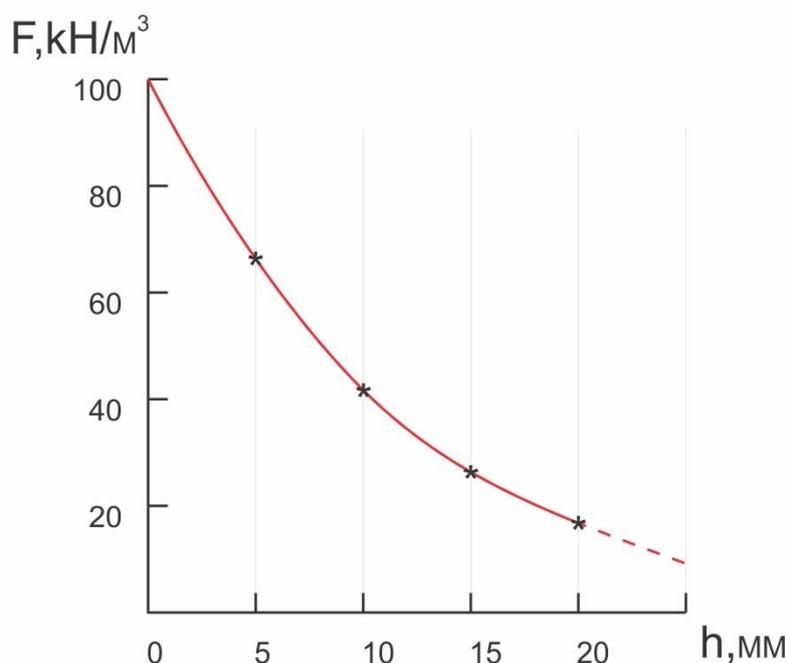


Рис. 5. Зависимость удельной силы левитации  $F$  от левитационного зазора  $h$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено оригинальное техническое решение, позволяющее значительно улучшить энергетические характеристики узла левитации за счет применения ленточного 2G ВТСП, работающего в пассивном режиме без транспортного тока, с использованием частичного эффекта Мейсснера-Оксенфельда и зацепления квантованных нитей магнитного потока на центрах пиннинга.

Сверхпроводниковое левитационное устройство на базе ленточных 2G ВТСП можно применять в двух модификациях бортового полюса:

1) криостат с 2G ВТСП обеспечивает две функции – левитации и боковой стабилизации;

2) криостат с 2G ВТСП в комбинации с постоянными магнитами выполняет функцию боковой стабилизации, а постоянные магниты обеспечивают левитацию [4].

### Автор заявляет что:

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

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Stephan R, de Andrade Junior R, Ferreira A, et al. Maglev-cobra: an urban transportation system for highly populated cities. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(2):16-25. doi: 10.17816/transsyst20151216-25.
2. Earnshaw S. On the nature of molecular forces which regulate the constitution of luminiferous ether. *Transactions of Cambridge Philosophie Society*. 1842;(V-VII):97-112.
3. Антонов Ю.Ф., Данилов Н.К., Казначеев С.А., и др. Разработка модельной установки и исследование левитации и боковой стабилизации платформы с использованием высокотемпературных сверхпроводников второго поколения // Транспортные системы и технологии. – 2015. – Т. 1. – №2. – С. 62–84. [Antonov YuF, Danilov NK, Kaznacheev SA, et al. Development of Model Setup And Study of Levitation and Lateral Stabilization of the Platform with the use of High-Temperature Superconductors of the 2<sup>nd</sup> Generation. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(2):62-84 (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20151262-84
4. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA *Magnitolevitatsionnaia transportnaia tekhnologiya*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 476 p. (In Russ.)] ISBN 978-5-9221-1540-7.

### Сведения об авторе:

Антонов Юрий Федорович, доктор технических наук;  
eLibrary SPIN: 2335-5765; ORCID: 0000-0002-6910-1622;  
E-mail: yuri-anto@yandex.ru

**Information about the author:**

Yuri F. Antonov, Doctor of Technical Sciences;  
eLibrary SPIN: 2335-5765; ORCID: 0000-0002-6910-1622;  
E-mail: yuri-anto@yandex.ru

**Цитировать:**

Антонов Ю.Ф. Устройство левитации и боковой стабилизации на базе ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 115–123. doi: 10.17816/transsyst201954115-123

**To cite this article:**

Antonov YuF. Levitation and Lateral Stabilization Device Based on a Second-Generation High-Temperature Superconductor. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):115-123. doi: 10.17816/transsyst201954115-123

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 338.47

DOI 10.17816/transsyst201954124-133

© **И. М. Гулый**

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

## МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ИНВЕСТИРОВАНИЯ В ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ

**Цель:** обосновать подход и дать описание методологии оценки экономических эффектов инвестирования в цифровые технологии; на примере транспортного комплекса и отдельно организаций железнодорожного транспорта раскрыть алгоритм оценки эффектов цифровых инвестиций на динамику затрат и финансовых результатов.

**Методы:** в статье использованы метод ретроспективного анализа взаимосвязей прироста инвестиций в цифровые технологии с динамикой показателей результатов операционной деятельности отдельных транспортных организаций и в целом транспортного комплекса.

**Результаты:** обосновано, что при должном инвестировании в цифровые технологии обеспечивается экономия основных элементов операционных затрат транспортных организаций: затрат труда, расходов на материалы, топливо и энергию. Предложенный подход имеет практическое значение в процессе подготовки экономического обоснования положений программ и проектов внедрения цифровых технологий.

**Заключение:** Оценен ожидаемый эффект дальнейшего роста инвестиций в цифровые технологии для транспорта как важнейшей инфраструктурной отрасли экономики: ожидаемых значений ежегодной экономии затрат труда, затрат на материальные ресурсы, коммерческих и управленческих расходов.

**Ключевые слова:** инвестиции в цифровые технологии; эффекты цифровой экономики; корреляционный анализ инвестиций; цифровая модель экономики.

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© **I. M. Guliy**

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

## METHODOLOGY FOR ASSESSING THE ECONOMIC EFFECTS OF INVESTING IN DIGITAL TECHNOLOGIES IN TRANSPORTATION

**Aim:** to substantiate the approach and describe the methodology for assessing the economic effects of investing in digital technologies; on the example of the transport complex

and railway transport organizations to reveal the algorithm for assessing the effects of digital investments on the dynamics of costs and financial results.

**Methods:** the article uses the method of retrospective analysis of the relationship of investment growth in digital technologies with the dynamics of indicators of operating performance of individual transport organizations and the transport complex as a whole.

**Results:** it is proved that with proper investment in digital technologies, the main elements of operating costs of transport organizations are saved: labor costs, materials costs, fuel and energy. The proposed approach is of practical importance in the process of preparing the economic justification of the provisions of programs and projects for the introduction of digital technologies.

**Conclusion:** The expected effect of further growth of investments in digital technologies for transport as the most important infrastructure sector of the economy is estimated: the expected values of annual savings in labor costs, material resources costs, commercial and management costs.

**Keywords:** investments in digital technologies; effects of digital economy; correlation analysis of investments; digital model of economy.

## ВВЕДЕНИЕ

С 2017 года в России руководством страны поставлены амбициозные цели и задачи в рамках реализации долгосрочной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» [1]. Одновременно запущен национальный проект «Цифровая экономика», предусмотренный «майскими» Указами Президента РФ В. Путина. В рамках национального проекта «Цифровая экономика» к 2024 году запланировано увеличение внутренних затрат на развитие цифровой экономики (по доле в ВВП) к 2018 году не менее, чем в 3 раза по сравнению с 2017 годом [2, 3]. Крупнейшая транспортная компания России – холдинг «Российские железные дороги» в своей деятельности также планирует рост затрат на цифровые технологии [4, 5]. Долгосрочной программой развития холдинга до 2025 года предусмотрено, что затраты на цифровые технологии и проекты с 2019 по 2025 гг. планируются в объеме 23 млрд. рублей в среднем в год по базовому варианту, а по оптимистичному – ежегодно до 32 млрд. рублей (для сравнения 2018 г. – 17,3 млрд. рублей) [6]. В качестве проблемной области реализации национальных программ и проектов автором автор отмечает отсутствие экономического обоснования эффектов роста инвестиционных затрат в цифровые технологии.

В статье предложен авторский подход к оценке связи инвестиций «в цифру» с экономическими параметрами деятельности на транспорте, дана оценка возможных эффектов инвестирования в цифровые технологии на операционные показатели деятельности организаций транспорта.

## МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Методология.

Предлагаемая методология оценки экономических эффектов инвестирования в цифровые технологии предполагает проведение ретроспективного анализа взаимосвязей прироста инвестиций «в цифру» с изменениями относительных показателей результатов операционной деятельности организаций транспортного комплекса. Необходимо рассчитать реальную динамику инвестиций в цифровые технологии за длительный временной период. Затем за тот же период – оценить изменения удельных показателей – доли различных элементов затрат и финансовых результатов в выручке организаций. Предлагается оценивать такие показатели, как доля в себестоимости продукции (услуг): прямых операционных затрат (в том числе затрат труда; затрат на материалы; затрат на топливо и энергию; амортизации; прочих затрат); коммерческих и управленческих расходов; операционной прибыли; сальдированного финансового результата (прибыли до налогообложения).

Далее необходимо отобрать те параметры операционной деятельности, на которые инвестиции «в цифру» оказывают значимое влияние. Критерий: значение линейного коэффициента корреляции в паре «инвестиции – операционные параметры», которое должно быть выше 60 % (0,6) (по модулю).

После обоснования предложенных зависимостей, нахождения причинно-следственных связей между показателями, необходимо оценить эффекты роста планируемых инвестиций на деятельность хозяйствующих субъектов [7]. В итоге будут получены подтвержденные расчетами данные о влиянии цифровой модели экономики на результаты хозяйственной деятельности на уровне организаций и отраслевых комплексов.

### Результаты исследования.

Ретроспективный анализ показателей инвестиционной деятельности – инвестиций в основной капитал и инвестиций в информационные и коммуникационные (цифровые) технологии транспортных организаций (по данным консолидированной отчетности Росстата по видам деятельности) [8] показывает, что тренды инвестирования в основные фонды и цифровые технологии имеют различную графическую траекторию [9]. За выбранный период исследования, с 2005 по 2017 гг., траектория инвестиций в основной капитал имеет «холмообразный» вид. Пик инвестиций по российской экономике приходится на 2012–2013 гг., далее инвестиции сокращаются (Рис. 1). По транспортному комплексу тренд имеет схожую графическую конфигурацию.

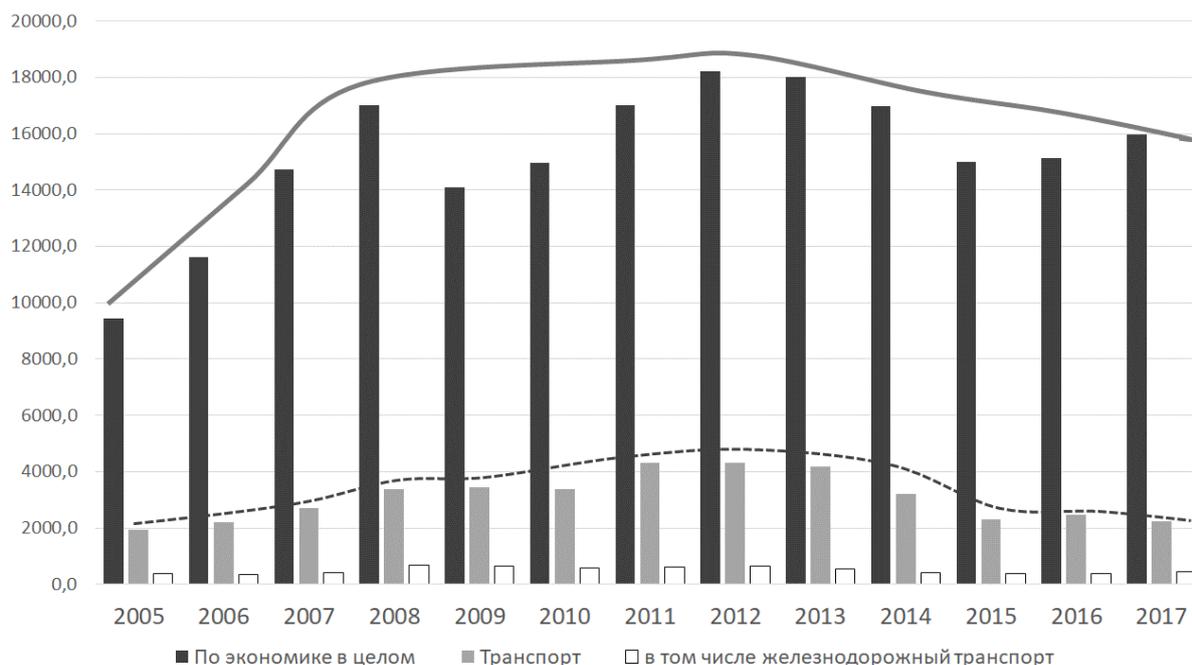


Рис. 1. Динамика инвестиций в основной капитал по экономике России, а также национальному транспортному комплексу, в том числе железнодорожному транспорту в 2005–2017 гг., в сопоставимых ценах 2017 года, млрд. рублей

Источник: построено автором на основе [9, 10, 11].

Примечание: здесь и далее на графиках показатели инвестиций приведены в сопоставимые цены с применением официальных индексов инфляции на капитальные активы – используемые основные средства, ежегодно публикуемые Росстатом.

Динамика инвестиций в информационные и коммуникационные (цифровые) технологии за период исследования, напротив, характеризуется устойчивой повышательной траекторией (Рис. 2). В последнее время (2015–2017 гг. и далее) затраты российских компаний, в том числе и транспортных, на приобретение вычислительной техники, телекоммуникационного оборудования, программного обеспечения значительно выросли. Рост инвестиций «в цифру» в транспортном комплексе за период с 2005 г. по 2017 г. в 2 раза превысил соответствующий рост по экономике в целом.

С 2015 г. по 2018 г. капитальные вложения «в цифру» в сфере транспорта наиболее существенно выросли по сектору вспомогательной и складской деятельности (в 3,9 раза), на водном транспорте, а также в авиации. На сухопутном и трубопроводном транспорте положительная динамика за ряд последних лет отсутствует (Рис. 3). Но в целом по транспорту рост инвестиций в информационные и коммуникационные технологии по крупным и средним организациям с 2015 г. по 2018 г. составил 50 %.

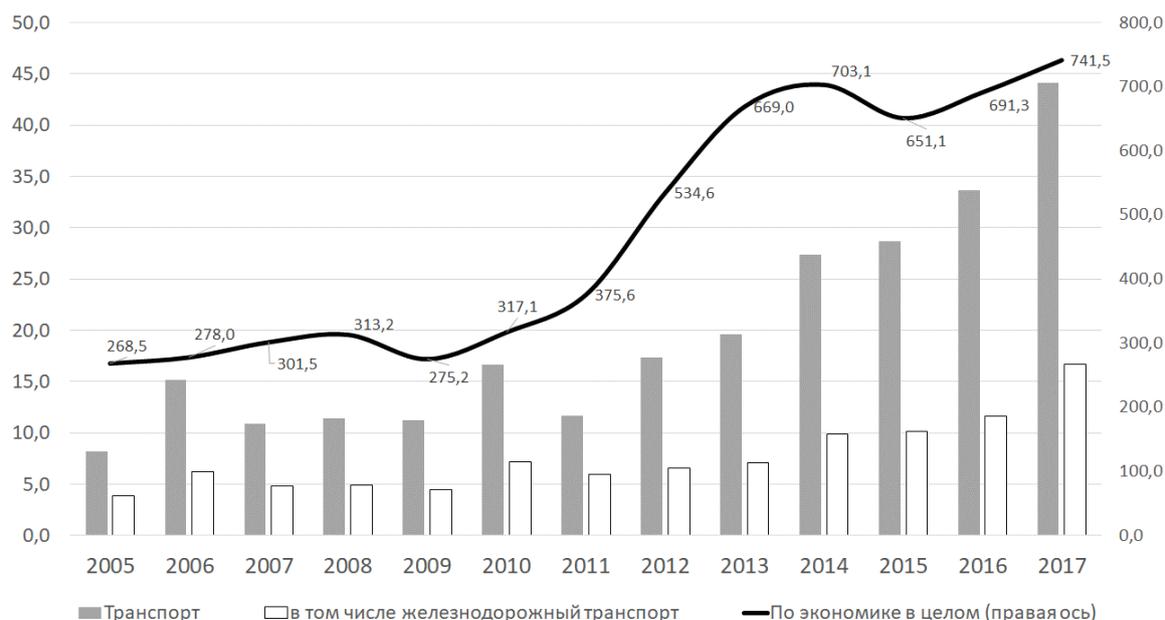


Рис. 2. Динамика затрат на информационные и коммуникационные (цифровые) технологии по экономике России в 2005–2017 гг., транспортному комплексу, в сопоставимых ценах 2017 года, млрд. рублей

Источник: построено автором на основе [10, 12].

Примечание: в методологии Росстата к инвестициям в информационные и коммуникационные (цифровые) технологии относятся затраты на приобретение вычислительной техники, телекоммуникационного оборудования, программного обеспечения [8].



Рис. 3. Инвестиции в информационные и коммуникационные (цифровые) технологии по укрупненным видам деятельности на транспорте в 2015–2017 гг., млрд. рублей

Источник: построено автором на основе [10, 11, 13].

В рамках предложенного подхода автором проведен анализ источников роста эффективности: какие факторы оказывают наибольшее влияние на изменение операционных результатов: инвестиции в обновление капитала или капитальные затраты в цифровые технологии?

Сопоставив ретроспективную динамику удельных операционных затрат и финансовых результатов (по доле в выручке от реализации услуг) с инвестициями, мы получили следующие выводы (Табл. 1).

Инвестиции «в цифру» наиболее существенно влияют на снижение удельных затрат на оплату труда. По транспорту в целом линейный коэффициент корреляции составил – 89,1 % (знак минус говорит о том, что рост инвестиций приводит к сокращению затрат труда). По железнодорожному транспорту влияние оценивается на уровне 60 % (коэффициент корреляции – 0,599). Согласно расчетам, можно утверждать, что на сокращение удельных затрат труда на транспорте в ретроспективе повлияли инвестиции в цифровые технологии, а традиционные «инвестиции в основной капитал» заметного влияния не оказывали.

Следующий элемент расходов, сокращение которых происходит вследствие инвестирования «в цифру» – это затраты на материальные ресурсы. Влияние в целом по транспорту – 68 % (в том числе по железнодорожному – 69,6 % (Табл. 1).

Сокращение затрат на топливо энергию за счет цифровых инвестиций отмечается только по транспортному комплексу в целом; на железнодорожных перевозках, согласно расчетам, отсутствует.

Если брать совокупные значения операционных результатов, то в целом за счет разнонаправленной динамики различных их элементов, влияние инвестиций «в цифру» на них неоднозначное (коэффициент корреляции – 0,5). Таким образом, инвестиции в цифру оказывают влияние лишь на отдельные элементы операционных расходов.

Интересный вывод получен после изучения парной корреляции инвестиций в основной капитал и инвестиций «в цифру» на относительные уровни в выручке коммерческих и управленческих расходов, финансовых результатов. При росте инвестиций отмечается одновременное повышение коммерческих и управленческих расходов. Как следствие, эффект сокращения отдельных элементов операционных расходов – затрат труда, материальных затрат – нейтрализуется отрицательным эффектом повышения затрат на административный аппарат и коммерческие операции. В итоге за исследованный период (2005–2017 гг.) не зафиксировано существенного улучшения финансовых результатов деятельности транспортных организаций. Экономия в одних случаях перекрывается перерасходом затрат в других.

Таблица. Парные линейные коэффициенты корреляции между показателями операционной деятельности и инвестициями в информационные и коммуникационные (цифровые) технологии; инвестициями в основной капитал, по транспортным организациям России, за период с 2005 г. по 2017 г.

Виды деятельности	Оплата труда		Затраты на материалы		Затраты на топливо и энергию		Амортизация		Прочие затраты	
	«1»	«2»	«1»	«2»	«1»	«2»	«1»	«2»	«1»	«2»
транспорт РФ	<b>-0,891</b>	0,163	<b>-0,680</b>	-0,445	<b>-0,766</b>	-0,083	-0,771	-0,196	-0,286	-0,264
в том числе железнодорожный транспорт	<b>-0,599</b>	0,844	<b>-0,696</b>	0,067	0,650	-0,046	-0,352	0,114	0,004	0,409

Виды деятельности	Операционные затраты в целом		Коммерческие и управленческие затраты		Прибыль от продаж		Прибыль до налогообложения	
	«1»	«2»	«1»	«2»	«1»	«2»	«1»	«2»
транспорт РФ	<b>-0,526</b>	0,211	0,844	0,141	-0,395	-0,331	-0,176	0,008
в том числе железнодорожный транспорт	<b>-0,503</b>	0,305	0,828	-0,270	-0,110	-0,198	-0,356	0,236

Примечание: затраты и финансовые результаты отражены в заголовках столбцов; цифрами в столбцах таблицы обозначены: «1» – инвестиции в информационные и коммуникационные (цифровые) технологии; «2» – инвестиции в основной капитал; жирным шрифтом выделены позиции с существенным положительным экономическим эффектом воздействия на отдельные элементы затрат.

Источник: рассчитано автором на основе [10, 14, 15].

На Рис. 4 приведена графическая интерпретация выводов исследования. Видим, что долгосрочный тренд инвестиций «в цифру» сопровождается нисходящей динамикой сокращения удельных затрат на оплату труда транспортных организаций.

Предложенный автором подход возможно применять при экономическом обосновании проектов, программ, стратегий, положения которых охватывают процессы цифровой трансформации транспортных организаций. Рассчитанный автором ожидаемый эффект при росте инвестиций «в цифру» минимум в 2 раза по транспортному комплексу сможет обеспечить ежегодную экономию затрат труда до 500 млрд. руб.; затрат на материальных ресурсы, применяемые в транспортной деятельности, – до 240 млрд. руб. Кроме того, сокращение доли коммерческих и управленческих затрат при внедрении цифровых систем, с 0,07 до, как минимум, 0,05 руб. на 1 рубль доходов от реализации транспортных услуг приведет к экономии еще порядка 260 млрд. руб.

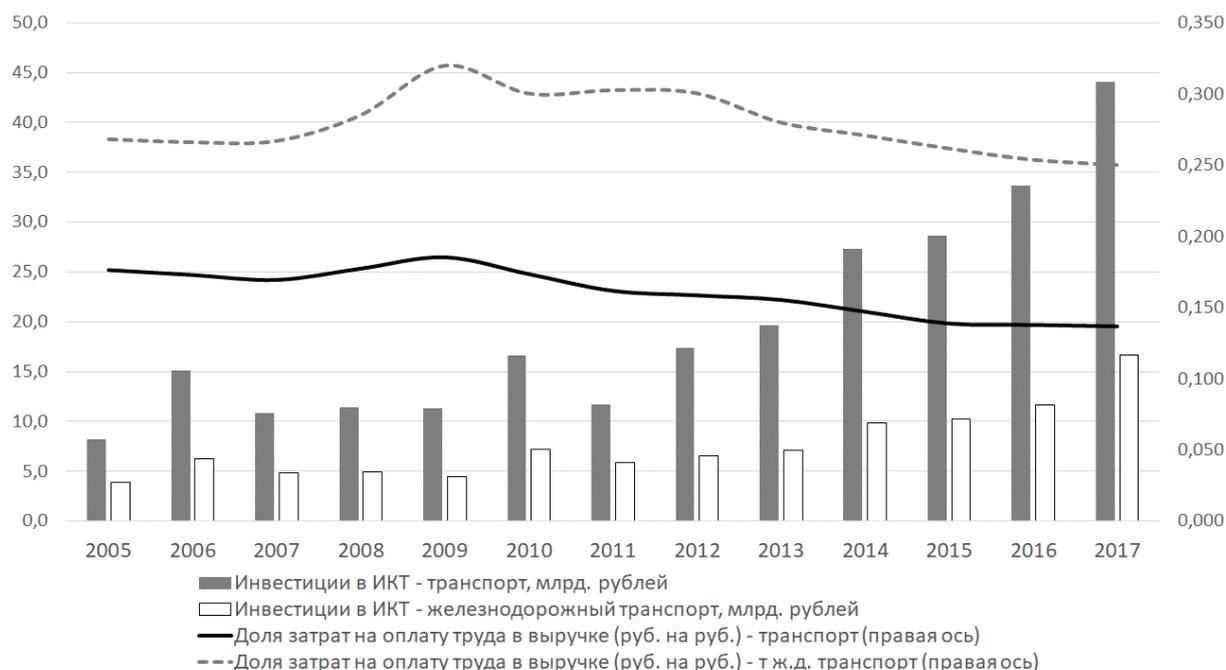


Рис. 4. Графическая взаимосвязь роста инвестиций в информационные и коммуникационные (ИКТ) «цифровые» технологии (в сопоставимых ценах 2017 г.) и сокращения удельных затрат труда в выручке от реализации по транспортному комплексу России, за период с 2005 г. по 2017 г.

Источник: рассчитано и построено авторами на основе [10, 12, 15].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важным итогом исследования является то, что цифровые технологии при должном инвестировании и одновременном решении проблемы неоправданного роста расходов по отдельным элементам способны обеспечить существенную экономию важнейших видов операционных затрат: затрат труда, расходов на материалы, топливо и энергию. Математически подтверждено, что наиболее существенно цифровые технологии влияют на сокращение трудовых затрат, затрат на материалы, топливо и энергию. Обеспечить экономическую эффективность перехода к цифровой модели экономики необходимо не только за счет фактора сокращения операционных расходов, но, безусловно, и на основе внедрения цифровых систем и технологий в управленческую сферу и коммерческие подразделения организаций.

## Библиографический список / References

1. Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации»: распоряжение Правительства РФ от 28 июля 2017 г. № 1632-р [Электронный ресурс]. [Ob utverzhdenii programmy “Cifrovaya ekonomika Rossijskoj Federacii”]:

- rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 28 iyulya 2017 g. № 1632-r [Internet] (In Russ.)). Доступно по: <http://www.government.gov.ru>. Ссылка активна на: 01.11.2019.
2. Паспорт национального проекта «Цифровая экономика Российской Федерации» [Электронный ресурс]. [Pasport nacional'nogo proekta "Cifrovaya ekonomika Rossijskoj Federacii"] [Internet] (In Russ.)). Доступно по: <https://digital.gov.ru>. Ссылка активна на: 10.11.2019.
  3. Цифровая экономика: глобальные тенденции и практика российского бизнеса: материалы исследования / отв. ред. Д. С. Медовников. – М.: Институт менеджмента инноваций НИУ ВШЭ, 2019. – 121 с. [Medovnikov DS, editor. *Cifrovaya ekonomika: global'nye tendencii i praktika rossijskogo biznesa: materialy issledovaniya*. Moscow: NIU VSHE, 2019. 121 p. (In Russ.)].
  4. Журавлева Н.А. Методология исследования цифровой трансформации в условиях дестабилизации бизнес-моделей транспортных организаций. В кн.: Методология развития экономики, промышленности и сферы услуг в условиях цифровизации / под ред. Бабкина А.В. – СПб: СПбПУ, 2018. – С. 10–47. [Zhuravleva NA. Metodologiya issledovaniya cifrovoj transformacii v usloviyah destabilizacii biznes-modelej transportnyh organizacij In: Babkin AV, editor. *Metodologiya razvitiya ekonomiki, promyshlennosti i sfery uslug v usloviyah cifrovizacii*. St. Petersburg: SPbPU, 2018. pp. 10-47 (In Russ.)].
  5. Волкова Е.М., Лякина М.А., Стримова А.В. Проблемы оценки экономических эффектов от использования цифровых технологий в городских транспортных системах // Бюллетень результатов научных исследований. – 2019. – № 1. – С. 59–68. [Volkova EM, Lyakina MA, Strimovskaya AV. Problems of economic effects assessment from digital technologies applying in urban transport systems. *Bulletin of scientific research results*. 2019;(1):59-68. (In Russ.)]. doi: 10.20295/2223-9987-2019-1-59-68
  6. Об утверждении долгосрочной программы развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» на период до 2025 года: распоряжение Правительства РФ 19 марта 2019 г. №466-р [Электронный ресурс]. [Ob utverzhdenii dolgosrochnoj programmy razvitiya otkrytogo akcionernogo obshchestva "Rossijskie zheleznye dorogi" na period do 2025 goda: rasporyazhenie Pravitel'stva RF 19 marta 2019 g. №466-r [Internet] (In Russ.)]. Доступно по: <http://www.government.gov.ru> Ссылка активна на: 08.10.2019.
  7. Zhuravleva NA, Gulyi IM, Polyanchko MA. Mathematical Description and Modelling of Transportation of Cargoes on the Base Digital Railway. Environment Technology Resources. In Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Rezekne Academy of Technologies; 2019;20(2):175. doi: 10.17770/etr2019vol2.4049
  8. Официальная статистическая отчетность крупных и средних организаций по форме 3-Информ «Сведения об использовании информационных и коммуникационных технологий и производстве вычислительной техники, программного обеспечения и оказании услуг в этих сферах». Росстат. [Электронный ресурс]. [Oficial'naya statisticheskaya otchetnost' krupnyh i srednih organizacij po forme 3-Inform "Svedeniya ob ispol'zovanii informacionnyh i kommunikacionnyh tekhnologij i proizvodstve vychislitel'noj tekhniki, programmnoho obespecheniya i okazanii uslug v etih sferah". Rosstat. [Internet] (In Russ.)]. Доступно по: <http://www.gks.ru>. Ссылка активна на: 15.11.2019.
  9. Журавлева Н.А. Проблемы оценки цифровых технологий на транспорте // Транспорт Российской Федерации. – 2019. – № 3 (82). – С. 19–22.

- [Zhuravleva NA. Problems of introduction of digital technologies in transport. *Transport Rossijskoj Federacii*. 2019;3(82):19-22 (In Russ.)].
10. Транспорт в России. 2018: стат. сб. / Росстат. – М., 2018. – 101 с. [Transport v Rossii: 2018. *Rosstat*. Moscow, 2018. 101 p. (In Russ.)].
  11. Инвестиции в России. 2017: стат. сб. / Росстат. – М., 2017. – 188 с. [Investicii v Rossii. 2017. *Rosstat*. Moscow, 2017. 188 p. (In Russ.)].
  12. Российский статистический ежегодник. 2018: стат. сб. // Росстат. – М., 2018. – 694 с. [Rossijskij statisticheskij ezhegodnik: 2018. *Rosstat*. Moscow, 2018. 694 p. (In Russ.)].
  13. Абдрахманова Г.И., Вишнеvский К.О., Гохберг Л.М. и др. Индикаторы цифровой экономики: 2019. стат. сб. // Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2019. – 248 с. [Abdrahmanova G.I., Vishnevskij K.O., Gohberg L.M. i dr. Indikatory cifrovoj ekonomiki: 2019. *Vyssshaya shkola ekonomiki*. Moscow: NIU VSHE, 2019. 248 p. (In Russ.)].
  14. Аброскин А.С., Зайцев Ю.К., Идрисов Г.И. и др. Экономическое развитие в цифровую эпоху. – М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2019. – 88 с. [Abroskin AS, Zajcev YuK, Idrisov GI, et al. Ekonomicheskoe razvitie v cifrovuyu epohu. Moscow: Delo, 2019. 88 p. (In Russ.)]. ISBN: 978-5-7749-1451-7
  15. Финансы России. 2018: стат. сб./ Росстат. – М., 2018. – 439 с. [Finansy Rossii: 2018. *Rosstat*. Moscow, 2018. 439 p. (In Russ.)].

**Сведения об авторе:**

Гулый Илья Михайлович, кандидат экономических наук  
eLibrary SPIN: 1788-1967, ORCID: 0000-0001-8676-1561;  
E-mail: ilya.guliy@mail.ru

**Information about author:**

Ilya M. Guliy, PhD  
eLibrary SPIN: 1788-1967; ORCID: 0000-0001-8676-1561;  
E-mail: ilya.guliy@mail.ru

**Цитировать:**

Гулый И.М. Методология оценки экономических эффектов инвестирования в цифровые технологии на транспорте // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 124–133. doi: 10.17816/transsyst201954124-133

**To cite this article:**

Guliy IM. Methodology for assessing the economic effects of investing in digital technologies in transportation. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):124-133. doi: 10.17816/transsyst201954124-133

## Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 338.47-656

DOI 10.17816/transsyst201954134-146

© **М. В. Фёдорова**Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I  
(Санкт-Петербург, Россия)**ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА  
МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОЙ ТРАССЫ (МЛТ)  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ – СЕРТОЛОВО**

**Обоснование:** Согласно мнению экспертов, наиболее востребованным видом городского общественного транспорта для городских агломераций является магнитолевитационный транспорт. В научной литературе отмечается, что развитие магнитолевитационного транспорта может стать реальным ответом на рост требований общества к качеству и скорости перемещения пассажиров в эпоху цифровизации экономики [1]. В связи с новыми трендами в эволюции транспортных систем в литературе обоснована необходимость использования принципиально новых видов транспорта, а также выявлены ограничения, накладываемые на дальнейшее совершенствование технологии «колесо-рельс».

**Цель:** Ввод в эксплуатацию линий магнитолевитационного транспорта в местах концентрации растущих пассажиропотоков, который будет способствовать сокращению временных затрат в пути, удовлетворению провозной потребности, улучшению качества и роста безопасности поездки при движении по выделенным полосам.

**Метод:** В статье выделены факторы, определяющие спрос на пользование магнитолевитационным транспортом. Спрогнозирован спрос на передвижение населения на примере линии магнитолевитационного транспорта «Санкт-Петербург - Сертолово» на перспективу до 2030 г. с учетом планов социально-экономического и градостроительного развития зоны тяготения. В статье спрогнозирована численность населения зоны тяготения проектируемой линии магнитолевитационного транспорта до 2030 года.

**Результаты:** В качестве основы развития транспортной системы городских агломераций предлагается использовать магнитолевитационный транспорт. Для его эксплуатации необходима специальная скоростная инфраструктура, новый подвижной состав. Проекты строительства и эксплуатации линий МЛТ имеют исключительно долгосрочный характер, существенно влияют на развитие городского транспорта, и поэтому их реализация возможна только в рамках стратегического управления развитием городских транспортных систем. Иными словами, появляется необходимость разработки и экономической оценки проектов строительства и эксплуатации линий магнитолевитационного транспорта при формировании и реализации транспортных стратегий городских агломераций современного типа.

**Ключевые слова:** скоростной городской транспорт, городские транспортные системы, магнитная левитация.

## Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© M. V. Fedorova

Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I  
(St. Petersburg, Russia)**JUSTIFICATION OF THE NEED FOR THE CONSTRUCTION  
OF THE MAGLEV ROUTE ST. PETERSBURG – SERTOLOVO**

**Background:** According to experts, the most popular form of urban public transport for urban agglomerations is radio-magnetic transport. The scientific literature notes that the development of magnetic transport can be a real answer to the growing demands of society on the quality and speed of movement of passengers in the era of digitalization of the economy [1]. In connection with new trends in the evolution of transport systems, the literature substantiates the need to use fundamentally new modes of transport, and also identifies the restrictions imposed on further improvement of the wheel-rail technology.

**Aim:** Putting into operation lines of magneto-transport vehicles in places of concentration of growing passenger flows, which will help to reduce travel time, meet freight requirements, improve the quality and increase travel safety when driving along dedicated lanes.

**Method:** The article identifies the factors that determine the demand for the use of magnetolithic transport. Demand for population movement has been predicted using the example of the St. Petersburg - Sertolovo magnetic transport line for the long term until 2030, taking into account plans for the socio-economic and urban development of the gravity zone. The article predicts the population of the gravity zone of the projected line of magneto-gravitational transport until 2030.

**Results:** As the basis for the development of the transport system of urban agglomerations, it is proposed to use magnetolithic transport. For its operation, a special high-speed infrastructure and a new rolling stock are needed. The projects for the construction and operation of MLT lines are extremely long-term in nature, significantly affect the development of urban transport, and therefore their implementation is possible only within the framework of strategic management of the development of urban transport systems. In other words, there is a need for the development and economic evaluation of projects for the construction and operation of magnetolithic transport lines in the formation and implementation of transport strategies of modern urban agglomerations.

**Keywords:** high-speed urban transport, urban transport systems, magnetic levitation.

**ВВЕДЕНИЕ**

Принципиально важную роль в процессе интеграции в рамках крупных агломераций играет городской общественный транспорт, являющийся главенствующим звеном в городской транспортной системе.

Рост городов и увеличение численности городского населения, формирование конурбаций являются причиной появления новых количественных и качественных характеристик городских транспортных

систем [2]. Количественная характеристика заключается в росте интенсивности пассажиропотоков; качественная – в росте скорости перемещения пассажиров. Рост интенсивности пассажиропотоков обусловлен тем, что значительная часть населения в процессе трудовой деятельности перемещается между зонами проживания, рекреации и местами приложения труда. Главной задачей городского транспорта в таких условиях является обеспечение часовой доступности транспортировки между всеми зонами конурбации, а это становится возможным только при росте скорости перемещения.

Главным преимуществом развития сети скоростного пассажирского общественного транспорта является резкое сокращение временных затрат на перемещение населения. Данная технология предполагает эффективную сеть городского общественного транспорта с обязательным выделением полос для общественного транспорта. В сложившихся условиях отставания в развитии метрополитена от роста спроса населения на скоростные перевозки, исчерпания пропускной способности основных магистралей мегаполисов и нехватки провозных возможностей видов общественного транспорта для повышения эффективности и качества транспортного обслуживания является необходимым развитие скоростного городского транспорта.

Мы предлагаем включить в транспортную систему городов *магнитолевитационный транспорт (МЛТ)*, который решает основные проблемы существующих видов транспорта:

- Экологическая безопасность. МЛТ обладает самым низким уровнем шумности среди известных видов транспорта. Оказывает минимальное воздействие на окружающую среду, требует незначительной полосы отчуждения [3].
- Безопасность перевозок. Конструкция МЛТ принципиально не подвержена опрокидыванию и сходу с рельс. Транспортная безопасность обеспечивается за счет эстакадного исполнения МЛТ, не имеющего пересечения с другими видами транспорта.
- Низкие инвестиционные затраты. Инфраструктура МЛТ имеет сравнительно низкую капиталоемкость. Малые затраты на землеотведение и выполнение технических условий, в связи с эстакадным исполнением линий МЛТ. Меньшая номенклатура компонентов и подсистем МЛТ по сравнению с существующими видами транспорта.
- Низкие эксплуатационные затраты. МЛТ имеет сравнительно малое энергопотребление и требует минимального обслуживания подвижного состава и пути из-за отсутствия трения. МЛТ износоустойчив.

- Высокие эксплуатационные характеристики. Скоростной режим ограничивается только длиной перегонов и количеством остановочных пунктов [4, 5].

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПРОСА НА ПОЛЬЗОВАНИЕ СКОРОСТНЫМ ГОРОДСКИМ ТРАНСПОРТОМ

К основным факторам, определяющим спрос на пользование магнитолевитационным транспортом (МЛТ), относятся:

- численность населения и количество мест приложения труда;
- уровень жизни населения и развития экономики;
- уровень автомобилизации;
- уровень развития транспортной инфраструктуры;
- затраты на проезд;
- уровень качества транспортного обслуживания.

Численность населения и его подвижность позволяют оценить потенциальный объем спроса на пользование МЛТ.

Явление магнитной левитации в последние десятилетия получило широкое распространение при производстве транспортных колесных систем. В транспортных средствах на магнитном подвесе сила тяжести уравновешивается силой магнитного поля. Такое транспортное средство в отличие от обычного железнодорожного или автомобильного транспорта не соприкасается с рельсом или дорожным покрытием. Таким образом, в магнитолевитационных системах исключаются потери, возникающие за счет сил трения. Расход энергии определяется затратами на преодоление лобового и магнитного сопротивления, на подъем платформы, разгон и торможение. Основные потери возникают за счет сил аэродинамического сопротивления. Путем правильного выбора формы вагона можно значительно снизить энергопотери [6, 7, 8].

МЛТ является эстакадным видом колесного транспорта и обладает всеми достоинствами и недостатками эстакадных линий. К его достоинствам относятся, прежде всего, безопасность, экологичность (пониженный уровень шума за счет отсутствия трущихся поверхностей и отсутствие вредных выбросов в атмосферу), скорость и сниженное энергопотребление за счет отсутствия сил трения, а также высокая пропускная способность.

МЛТ имеет низкие показатели энергопотребления. Энергозатраты в среднем в расчете на 1 пасс-км составляют 0,21 кВт/час, что в условиях тарифов для четвертой ценовой группы предприятий Москвы составляет 0,29 руб. Следует отметить, что энергозатраты занимают существенную долю в структуре операционных расходов: в пиковом режиме для

рельсового транспорта они существенно превышают среднее значение 29 % [9, 10, 11].

Уровень жизни населения оказывает существенное влияние на транспортную подвижность и выбор вида транспорта. Развитие экономики, рост реальных доходов населения и повышение уровня жизни населения оказывают непосредственное влияние на рост числа легковых автомобилей в личной собственности граждан, который определяет уровень подвижности на индивидуальном транспорте.

Рост реальных доходов населения и повышение уровня жизни определяют увеличение корреспонденций с туристическими и рекреационными целями.

Развитие транспортной инфраструктуры также способствует увеличению транспортной подвижности населения, определяя условия движения транспорта и влияя на показатели скорости транспортного обслуживания населения, а также формируя индуцированный спрос на передвижения, особенно в сегменте культурно-бытовых поездок.

Увеличение затрат на оплату проезда может привести к снижению транспортной подвижности населения, в первую очередь, по культурно-бытовым передвижениям, что скажется соответственно на суммарных объемах перевозок. Стоимость проезда оказывает значительное влияние и на распределение спроса на пассажирские перевозки между видами транспорта.

Прогноз факторов, определяющих спрос на пользование МЛТ, может быть выполнен на основе следующих документов:

- Стратегия экономического и социального развития Санкт-Петербурга на период до 2030 года, утвержденная постановлением Правительства Санкт-Петербурга [12];
- Прогноз социально-экономического развития Санкт-Петербурга и Ленинградской области;
- Прогноз социально-экономического развития муниципального образования муниципальных районов Ленинградской области;
- проекты планировки территорий зоны тяготения линии МЛТ и др.

В настоящее время в центральных районах города сконцентрировано 40 % рабочих мест, а на периферии проживает 84 % экономически активного населения мегаполиса. Это становится причиной мощных маятниковых грузо- и пассажиропотоков на связях между периферийными и центральными районами.

Прогноз численности населения муниципальных образований зоны тяготения проектируемой линии МЛТ по направлению «Сертолово – Санкт-Петербург» был выполнен на период до 2030 года на основе прогнозов социально-экономического развития муниципальных образований Санкт-Петербурга и Ленинградской области на средне- и

долгосрочный период, градостроительной документации, планов застройки жилых кварталов строительных компаний.

Численность населения муниципальных образований зоны тяготения линии МЛТ в 2030 году составит более 470 тыс. чел., превысив уровень 2014 года в 1,7 раза, зоны непосредственного тяготения – 236 тыс. чел. (в 2,6 раза). Наибольший рост численности населения прогнозируется в Бугровском сельском поселении и поселке Парголово в связи с активной жилой застройкой территорий муниципальных образований (Табл. 1, Рис.).

Таблица 1. Прогноз численности населения муниципальных образований зоны тяготения проектируемой линии МЛТ по направлению «Сертолово – Санкт-Петербург» до 2030 г., (тыс. чел.)

Муниципальное образование	2014 г.	2020 г.	2025 г.	2030 г.
Муниципальные образования Выборгского района Санкт-Петербурга				
Муниципальный округ Парнас	68,7	73,4	75,3	77,2
Муниципальный округ Шувалово-Озерки	110,2	123,3	131,0	137,8
Посёлок Левашово	4,0	5,0	5,4	5,5
Посёлок Парголово	28,6	70,6	73,5	75,3
Муниципальное образование Курортного района				
Поселок Песочный	8,5	9,4	9,9	10,4
Муниципальные образования Всеволожского муниципального района Ленинградской области				
Сертолово	50,9	80,1	84,2	88,5
Бугровское сельское поселение	10,4	61,7	67,1	73,0
Юкковское сельское поселение	3,6	4,3	5,1	5,9
Итого	284,9	427,8	451,5	473,6
в том числе: зона непосредственного тяготения линии МЛТ	89,9	212,4	224,8	236,8

В соответствии со среднесрочными прогнозами социально-экономического развития Санкт-Петербурга и Ленинградской области в период 2015–2017 гг. среднегодовой темп роста реальных денежных доходов населения составит соответственно: 101,6–102,3 %, 102,0–103,5 %. По прогнозу реальные денежные доходы населения в Санкт-Петербурге и Ленинградской области к 2030 году по сравнению с 2014 годом увеличатся в 2,0–2,2 раза.

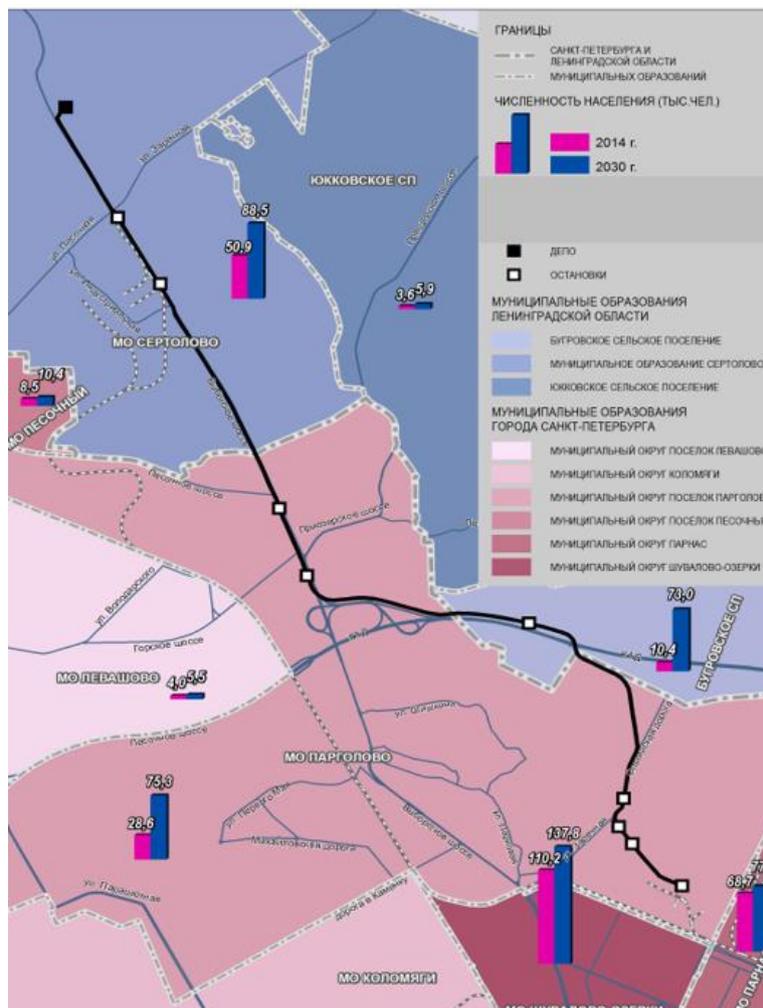


Рис. Прогноз численности населения муниципальных образований зоны тяготения проектируемой линии МЛТ по направлению «Сердолово – Санкт-Петербург» до 2030 г.

На период 2015–2017 гг. в Ленинградской области среднегодовой рост среднемесячной номинальной начисленной заработной платы прогнозируется на уровне 109–110 %, в Санкт-Петербурге – 110–111 %. Рост реальной заработной платы в 2030 году по сравнению с 2014 годом в двух субъектах Российской Федерации ожидается на уровне 1,4–1,5 раз. Рост денежных доходов населения обуславливает рост уровня автомобилизации.

С 2009 года уровень автомобилизации в Санкт-Петербурге увеличился на 14,6 % и составил в 2013 году 318,4 автомобилей на 1000 жителей. В Ленинградской области в 2013 году уровень автомобилизации составил 283,7 автомобилей на 1000 жителей, или 116 % к уровню 2009 года. Повышение доходов населения Санкт-Петербурга и Ленинградской области будет сопровождаться ростом уровня автомобилизации населения (число легковых автомобилей в расчете на 1000 жителей) [13].

По данным ГУ МВД России по Санкт-Петербургу и Ленинградской области, количество автотранспортных средств, зарегистрированных на территории Всеволожского муниципального района, выросло за период 2009–2013 гг. на 13,3 % и составило 106,8 тыс. ед.

Уровень автомобилизации Всеволожского муниципального района в 2013 году составил 333 автомобилей на 1000 жителей и снизился на 3,5 % к уровню 2009 года в связи с ростом численности населения района.

В соответствии с Государственной программой «Развитие автомобильных дорог Ленинградской области» (в ред. Постановлением Правительства Ленинградской области от 31.10.2014 № 506) уровень автомобилизации населения Ленинградской области в 2030 г. возрастет до 600 автомобилей на 1000 чел.

По прогнозу, выполненному в рамках данного исследования, уровень автомобилизации в 2030 году в Ленинградской области составит 540 автомобилей на 1000 жителей (рост по сравнению с 2013 годом в 1,9 раза), в Санкт-Петербурге – 580 автомобилей на 1000 жителей (рост по сравнению с 2013 годом в 1,8 раза).

По Прогнозу социально-экономического развития муниципального образования «Всеволожский муниципальный район» Ленинградской области на 2015 год и на плановый период 2016 и 2017 годов, в районе намечается тенденция умеренного роста объемов промышленного производства. В 2017 году выпуск промышленной продукции возрастет на 32 % по сравнению с 2014 годом.

К существующей специализации Всеволожского муниципального района (логистика и транспорт, машиностроение, деревообработка, целлюлозно-бумажная промышленность, строительные материалы, пищевая промышленность, химическое производство) получают развитие: автомобильный кластер, новая логистика, туризм, финансовый сектор, операции с недвижимым имуществом. Ожидается рост инвестиционной активности. Так, инвестиции в основной капитал в 2017 году увеличатся по сравнению с 2014 годом на 22,6 %. Рост инвестиций в основной капитал во Всеволожском муниципальном районе будет обусловлен в частности строительством второй очереди производственно-технического комплекса ООО «Цементно-бетонные изделия» в Сертолово, микрорайон Сертолово-1 (2015–2016 гг.).

В муниципальных образованиях зоны тяготения линии МЛТ развитие производственно-складского хозяйства, общественно-деловых зон (промышленная зона «Парнас», МФК «Евроград», складской комплекс класса «В», производственно-технический комплекс ООО «ЦБИ» и др.) будет сопровождаться ростом числа мест приложения труда, обуславливая спрос на передвижения с трудовыми целями.

Таким образом, рост численности населения, уровня жизни населения, развитие транспортной и производственно-складской инфраструктуры, общественно-деловых зон в муниципальных образованиях зоны тяготения линии МЛТ по направлению «Сертолово – Санкт-Петербург» будут выступать основными факторами роста спроса на передвижения населения с трудовыми, учебными и культурно-бытовыми целями.

Оценка планировочных особенностей улично-дорожной сети показала следующее:

- через Сертолово проходит Выборгское шоссе – автомобильная дорога (А-122, Санкт-Петербург – Огоньки) регионального значения имеет мощный транзитный поток автотранспорта;
- отсутствуют магистрали в обход Сертолово, что предопределяет высокий уровень транспортных нагрузок на всех основных городских магистралях города.

В соответствии с принятыми программными документами в зоне тяготения линии МЛТ предусматривается строительство автодорожного обхода Сертолово и реконструкция участка кольцевой автомобильной дороги вокруг Санкт-Петербург от станции «Горская» до Приозерского шоссе. Данные мероприятия существенно повлияют на транспортный комплекс города: улучшатся условия движения пассажирского транспорта и легковых автомобилей на всех основных городских магистралях.

Прогноз спроса населения по линии МЛТ на пассажирские перевозки может осуществляться расчетным путем с использованием методов математического моделирования. Прогноз потенциального спроса населения на пассажирские перевозки линией МЛТ может быть выполнен с учетом:

- существующей и перспективной социально-экономической характеристики зоны тяготения линии МЛТ;
- характеристики существующей транспортной системы обслуживания населения вдоль трассы МЛТ, в том числе оценки существующих пассажиропотоков зоны тяготения на маршрутах пассажирского транспорта;
- развития системы пассажирского транспорта рассматриваемой зоны, регламентированной принятыми программными документами.

Пассажирские перевозки города Сертолово в настоящее время осуществляются железнодорожным и автомобильными видами пассажирского транспорта (автобус, легковые автомобили). Существующая транспортная система включает следующие виды пассажирских корреспонденций:

- пригородно-городские сообщения, обеспечивающие связь пассажиров между Санкт-Петербургом и пригородной зоной;

- пригородные пассажирские сообщения, не связанные с Санкт-Петербургом, обеспечивающие связи в пределах территории пригородной зоны, включая транспортные передвижения между городами и населенными пунктами, а также поездки внутри городов и поселков пригородной зоны.

Таким образом, суммарный пассажиропоток на автобусных маршрутах, следующих из Сертолово в направлении Санкт-Петербурга составляет 620 пасс/час в период пиковых нагрузок.

На основе имеющихся данных был выполнен прогноз пассажиропотоков. На данном этапе прогноз спроса по трассе МЛТ был выполнен без введения платы за проезд. Кроме этого, в расчетах не были введены ограничения спроса на пассажирские перевозки по предельной пропускной способности остановок МЛТ и провозной возможности подвижного состава, что вызвало практически прямолинейную зависимость спроса от времени проезда с учетом времени пешеходного подхода к остановкам МЛТ.

В рамках настоящей работы для расчета пиковых нагрузок на линии МЛТ были использованы пассажирские корреспонденции на общественном транспорте с трудовыми и учебными целями в будний день. Пиковые нагрузки на систему общественного транспорта, как показали результаты обследований, приходятся в основном на период 7:00–8:30 и определяются трудовыми и учебными передвижениями. При этом культурно-бытовые корреспонденций пассажиров из расчетов были исключены, что обусловлено низкой долей таких корреспонденций в пассажиропотоке, приходящихся на пиковые периоды утра буднего дня. Учет таких корреспонденций в суточном пассажиропотоке был проведен при определении коэффициентов перехода от часовых к суточным показателям. При их определении, а также при определении коэффициентов перехода к годовым показателям были использованы данные по динамике пассажиропотоков, предоставленные Санкт-Петербургским метрополитеном [14, 15, 16].

Прогноз объемов перевозок по трассе МЛТ представлен в Табл. 2.

Таблица 2. Прогноз объемов перевозок на линии МЛТ по направлению «Сертолово – Санкт-Петербург»

Год	Объем перевозок пассажиров		
	Утренний период (6–10 чч.)	Среднегодовой суточный, чел./сут	Годовой, тыс. чел./год
2015 г.	5480	14680	5360
2020 г.	14060	37600	13720
2025 г.	14800	39560	14441
2030 г.	16840	45050	16340

Анализ результатов показал:

- основной спрос на линии МЛТ формируется на остановках, расположенных в Сертолово, и в зоне влияния станции метрополитена «Парнас» за счет строительства новых жилых зон с многоквартирными домами;
- к 2030 году значительно увеличится спрос на остановке у жилого комплекса «Евроград» за счет активного строительства жилья в этой зоне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Планируемая МЛТ от Санкт-Петербурга до Сертолово, проходит через территории массовой жилищной застройки и обеспечивающей связи пассажиров со станцией метрополитена «Парнас». Целью внедрения линии этой МЛТ является улучшение транспортного обслуживания и снижение затрат времени на поездки населения города Сертолово за счет обеспечения скоростных сообщений, повышения технического уровня подвижного состава и остановок МЛТ, что существенно влияет на комфортность передвижения пассажиров. Кроме этого, внедрение линии МЛТ позволит переключить пользователей легковых автомобилей на линию МЛТ, что снизит загрузку Выборгского шоссе и уменьшит загрязнение окружающей среды.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Лapidус Б.М. О влиянии цифровизации и индустрии 4.0 на перспективы развития железнодорожного транспорта // Бюллетень Объединённого учёного совета ОАО «РЖД». – 2018. – №1. – С. 1–7. [Lapidus B.M. O vliyaniy tsifrovizatsii i industrii 4.0 na perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta. Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways. 2018;1:1-7. (In Russ.)]. Доступно по: [http://vniizht.ru/fileadmin/site/files/bulletin/Bulleten\\_OUS\\_2018\\_1.pdf](http://vniizht.ru/fileadmin/site/files/bulletin/Bulleten_OUS_2018_1.pdf) Ссылка активна на: 01.10.2019.
2. Фёдорова М.В. Экономическое обоснование стратегии развития скоростного городского транспорта на основе магнитной левитации: дис. канд. экон. наук. – СПб; 2019. – 169 с. [Fedorova M.V. Ekonomicheskoye obosnovaniye strategii razvitiya skorostnogo gorodskogo transporta na osnove magnitnoy levitatsii [dissertation]. St. Petersburg; 2019. 169 p. (In Russ.)].
3. Городской транспорт энергоэффективность, экологически устойчивый транспорт: сборник материалов для политических деятелей в развивающихся городах. – Берлин: GIZ, 2013. [Gorodskoy transport energoeffektivnost', ekologicheski ustoychivyy transport: sbornik materialov dlya politicheskikh deyatelay v razvivayushchikhsya gorodakh [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <http://greenlogic.by/content/files/dad357e3aec74d42c89c14e4d4fb872.pdf> Ссылка активна на 01.02.2019.

4. Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны: монография – СПб: Типография «НП-Принт», 2015. – 140 с. [Zaitsev AA. Magnitolevitatsionny transport in a single transport system of the country: monograph. St. Petersburg: NP-Print; 2015. 140 p. (In Russ.)].
5. Зайцев А.А., Соколова Я.В., Талашкин Г.Н. Транспорт на магнитном подвесе (монография). СПб: ПГУПС, второе издание, 2011. [Zaitsev AA, Sokolova YaV, Talashkin GN. Transport na magnitnom podvese (monograph). 2nd ed. St. Petersburg: PGUPS; 2011. (In Russ)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004907216>. Ссылка активна на: 02.11.2019.
6. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / под ред. Ю.Ф. Антонова, А.А. Зайцева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 612 с. [Zaitsev AA, Antonov YuF, editors. Magnitolevitatsionnyj transport: nauchnye problemy i tekhnicheskie resheniya. Moscow: FIZMATLIT; 2015. 612 p. (In Russ)]. Доступно по: <https://b-ok.org/book/2910926/a2ce27>. Ссылка активна на: 02.10.2019.
7. Вакуумно-левитационные транспортные системы: научная основа, технологии и перспективы для железнодорожного транспорта: коллективная монография членов и научных партнёров Объединённого учёного совета ОАО «РЖД» / под ред. Б.М. Лapidуса и С.Б. Нестерова. – М.: ООО «РАС», 2017. – 192 с. [Lapidus BM, Nesterov SB, editors. Vakuumno-levitatsionnyye transportnyye sistemy: nauchnaya osnova, tekhnologii i perspektivy dlya zheleznodorozhnogo transporta: kollektivnaya monografiya chlenov i nauchnykh partnerov Ob"yedinonnogo uchonogo soveta ОАО “RZHD”. Moscow: Printing House “RAS”; 2017. 192 p. (In Russ.)].
8. Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт: ответ на вызовы времени // Транспортные системы и технологии. – 2017. – № 1 (7). – С. 5–19. [Zaitsev AA, Magnitolevitatsionny transport: otvet na vyzovy vremeni. Transportation Systems and Technology. 2017;1(7suppl.1):5-19. (In Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst2017315-13
9. Shanghai maglev – all you need to know maglev.net [cited 2017 Sept. 12]. Available from: <http://www.maglev.net/shanghai-maglev>
10. Vuchic VR, Casello JM. An evaluation of Maglev technology and its comparison with high speed rail Transportation Quarterly [cited 2017 Sept. 13]. Available from: <http://www.thetransitcoalition.us/LargePDFfiles/maglevEvalandComparisonHSR.pdf>
11. FTA Low-Speed Urban Maglev Research Program [cited 2017 Sept. 13]. Available from: <http://faculty.washington.edu/jbs/itrans/FTALowSpeedLessonsLearned.pdf> (13/09/2017).
12. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г.: утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-р [Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 g.: utv. Rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 22.11.2008 g. № 1734-r. [Internet]. (In Russ)]. Режим доступа: [http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT\\_ID=13008](http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=13008). Дата обращения: 12.01.2019.
13. Концепция развития транспортной системы Санкт-Петербурга 2017–2038 гг. (перспектива до 2048г.) [Электронный ресурс]. [Kontseptsiya razvitiya transportnoy sistemy Sankt-Peterburga 2017-2038 gg. (perspektiva do 2048g.) [Internet]. (In Russ)]. Режим доступа: <http://krti.gov.spb.ru/kontsepciya-razvitiya-transportnoj-sistemy-sankt-peterburga/> Дата обращения: 12.11.2019.
14. АНО «Дирекция по развитию транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области» Отчёт «Анализ перспективного пассажиропотока и разработка тарифной политики по линии легкого рельсового транспорта по

- направлению Сертолово – Санкт-Петербург». – 2015. [ANO “Direktsiya po razvitiyu transportnoy sistemy Sankt-Peterburga i Leningradskoy oblasti” Otchot “Analiz perspektivnogo passazhiropotoka i razrabotka tarifnoy politiki po linii legkogo rel'sovogo transporta po napravleniyu Sertolovo – Sankt-Peterburg”. 2015. (In Russ.)].
15. Техническое задание на разработку Стратегии развития транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области на период до 2030 года [Электронный ресурс]. [Tekhnicheskoye zadaniye na razrabotku Strategii razvitiya transportnoy sistemy Sankt-Peterburga i Leningradskoy oblasti na period do 2030 goda [Internet]. (In Russ)]. Режим доступа: <http://docplayer.ru/27602974-Tekhnicheskoe-zadanie-na-razrabotku-strategii-razvitiya-transportnoy-sistemy-sankt-peterburga-i-leningradskoy-oblasti-na-period-do-2030-goda.html> Дата обращения: 17.11.2019.
  16. Стратегия социально-экономического развития Ленинградской области до 2030 года от 13 июля 2016 года [Электронный ресурс]. [Strategiya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Leningradskoy oblasti do 2030 goda ot 13 iyulya 2016 goda [Internet]. (In Russ)]. Режим доступа: [http://lenoblinvest.ru/images/Strategy\\_2030.pdf](http://lenoblinvest.ru/images/Strategy_2030.pdf) Дата обращения: 16.11.2019.
  17. Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – № 2 (69) – 2011. [Vestnik Kazahskoj akademii transporta i kommunikacij im. M. Tynyshpaeva. – № 2 (69). – 2011. [Internet]. (In Russ)]. Режим доступа: [http://lenoblinvest.ru/images/Strategy\\_2030.pdf](http://lenoblinvest.ru/images/Strategy_2030.pdf) Дата обращения: 16.11.2019.

**Сведения об авторе:**

**Фёдорова Мария Владимировна**, к.э.н., ассистент кафедры «Экономика транспорта»;  
eLibrary SPIN-1518-7831; ORCID: 0000-0003-2740-573X;  
E-mail: tale19quale@mail.ru

**Information about the author:**

**Fedorova Maria**, PhD Economics, Assistant of Department of Economic of Transport;  
eLibrary SPIN-1518-7831; ORCID: 0000-0003-2740-573X;  
E-mail: tale19quale@mail.ru

**Цитировать:**

Фёдорова М.В. Обоснование необходимости строительства магнитолевитационной трассы (МЛТ) Санкт-Петербург – Сертолово // *Транспортные системы и технологии*. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 134–146. doi: 10.17816/transsyst201954134-146

**To cite this article:**

Fedorova MV. Justification Of the need for the Construction of the Maglev Route St. Petersburg – Sertolovo. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):134-146. doi: 10.17816/transsyst201954134-146