

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].

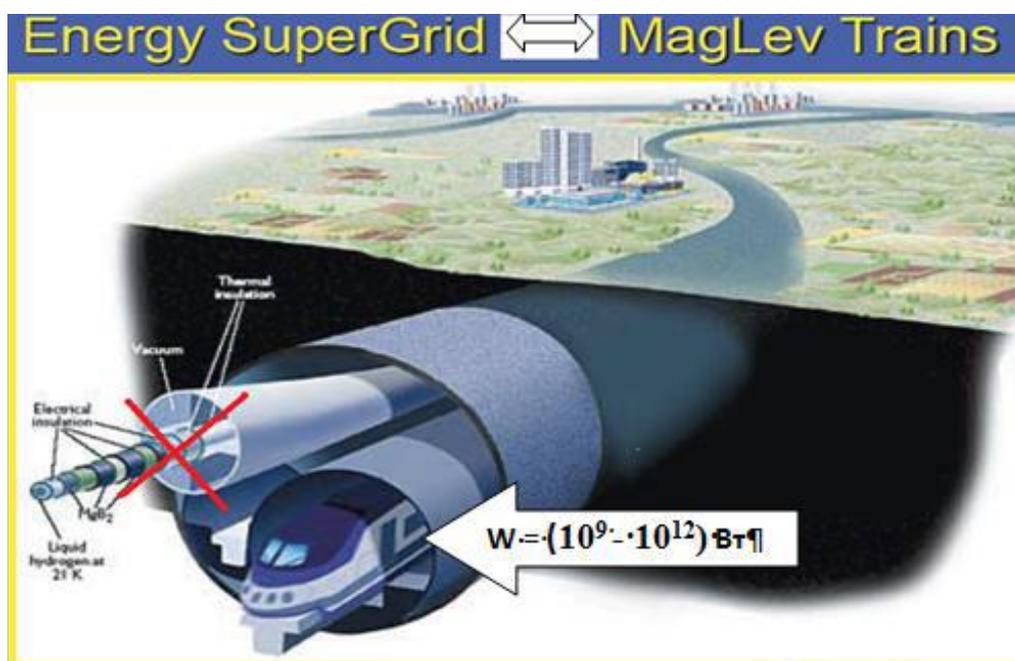


Рис. 3. Вариант концепции сверхмощного и сверхскоростного «энергопровода» гига- и тераваттного класса мощности [11]

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 рейстректовой 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.

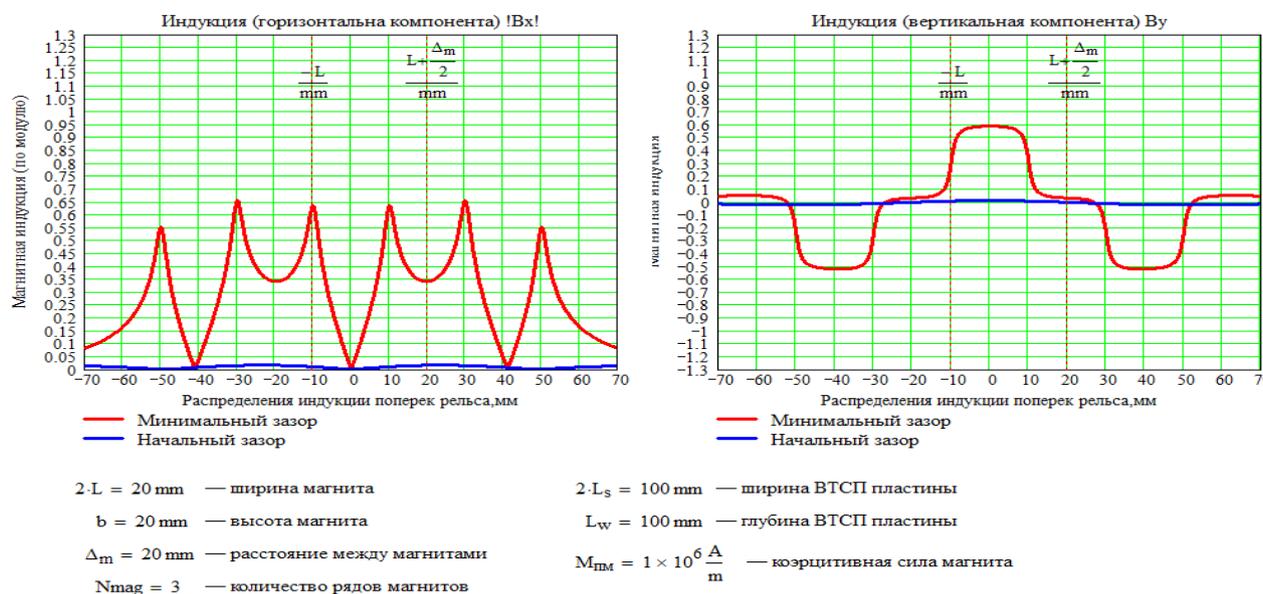


Рис. 5. Результаты расчёта конфигурации магнитного поля (в Тл по оси  $y$  и в мТл по оси  $x$ ) над рабочей поверхностью одного из макетов трассы ВМЛТ на основе постоянных магнитов на основе NdFeB

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.

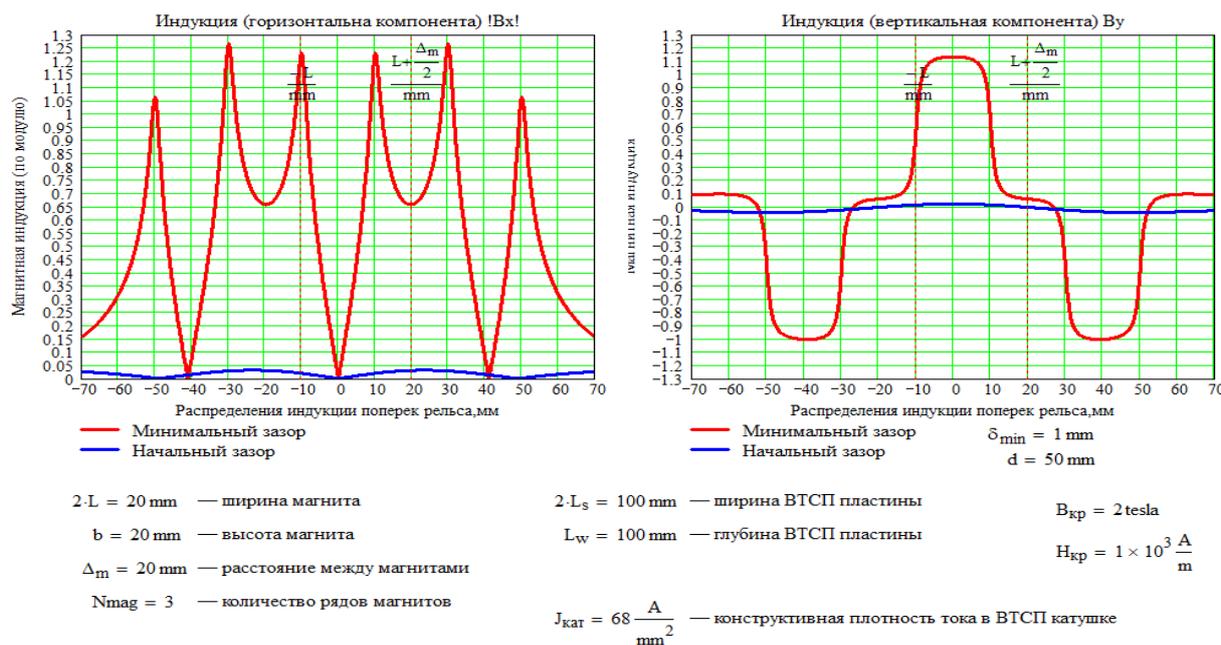


Рис. 6. Результаты расчёта конфигурации магнитного поля  
(в Тл по оси  $y$  и в мм по оси  $x$ )  
над рабочей поверхностью одного из макетов трассы ВМЛТ

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).

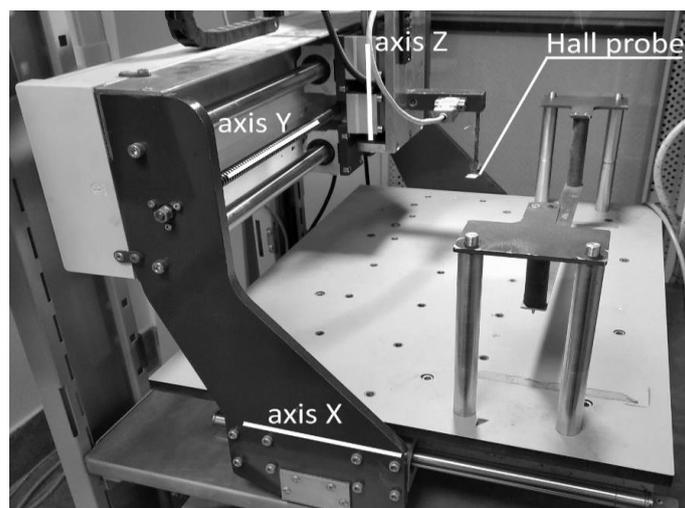


Рис. 7. Автоматизированная установка трёхмерной Холловской магнитометрии [28]

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.

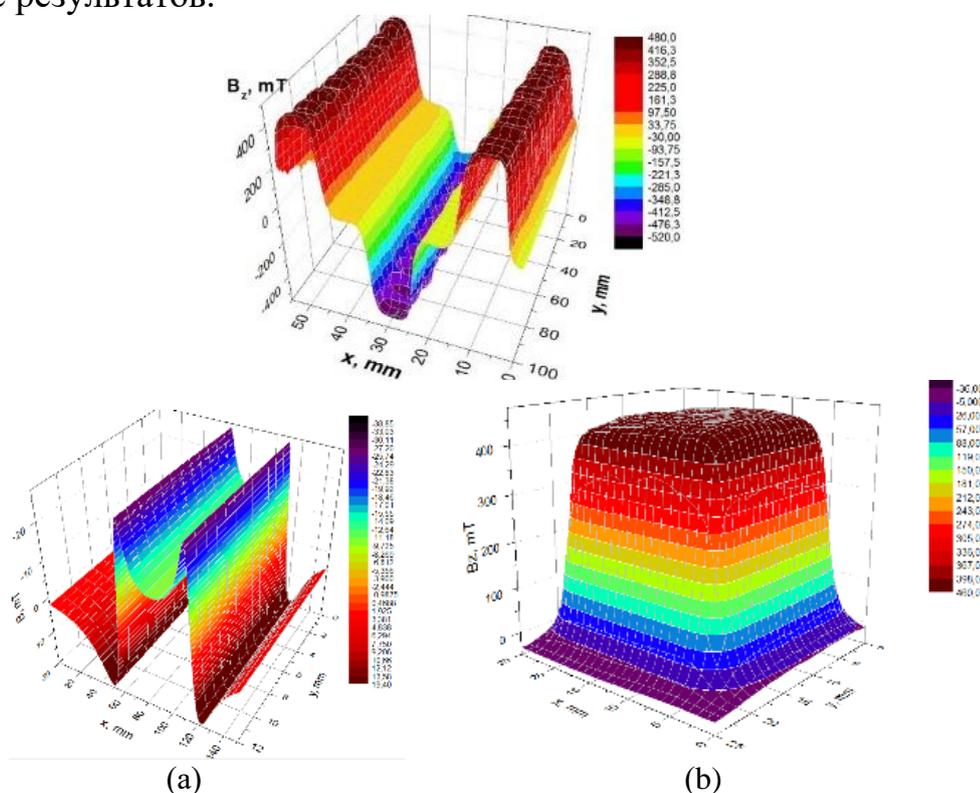


Рис. 8. Примеры результатов измерения топологии магнитного поля вариантов трассы (a) и единичного магнита (b)

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.

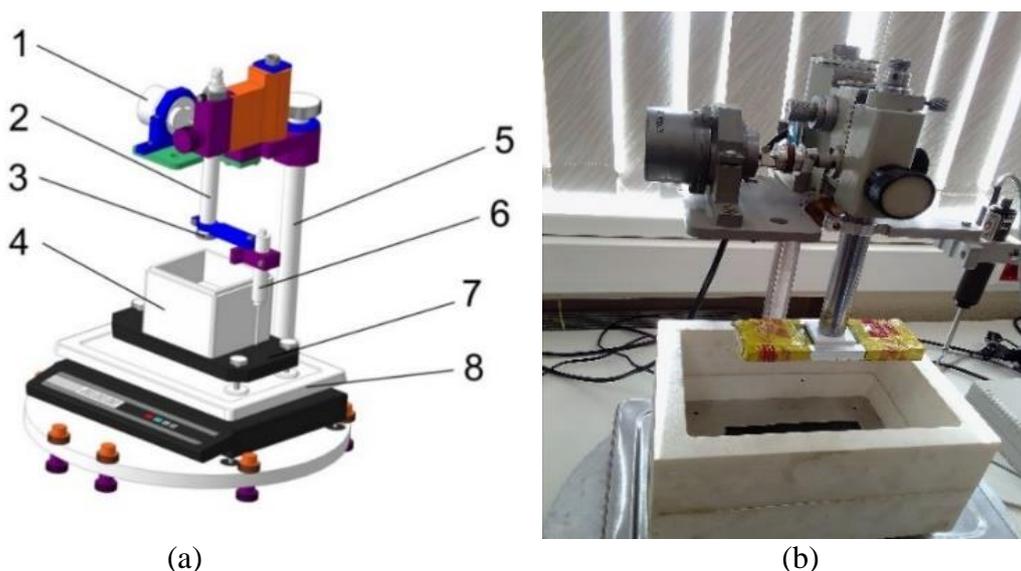


Рис. 9. Схема и фотография устройства для измерения сил левитации:

- 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).

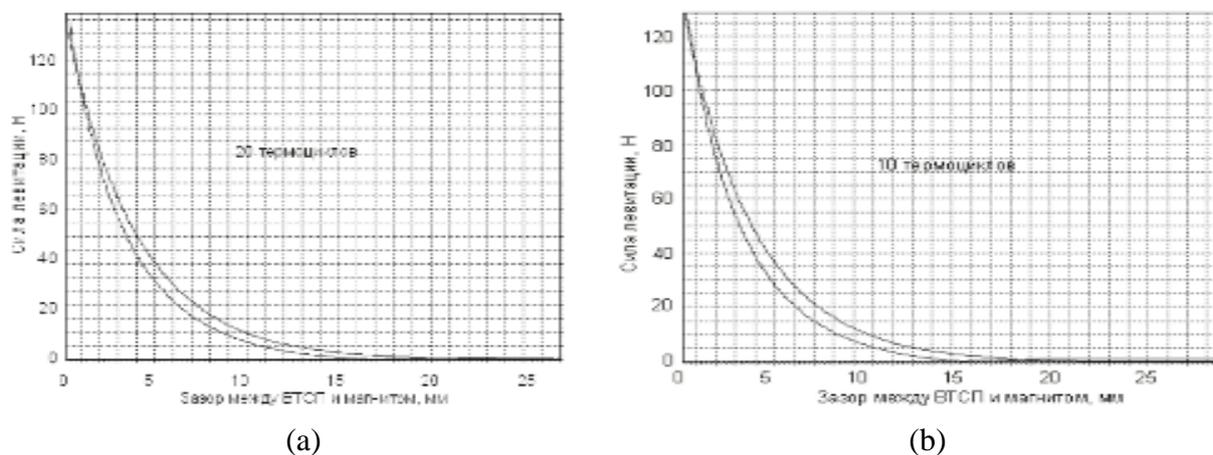


Рис. 10. Пример характерных зависимостей силы левитации от расстояния для образца (а) после 20 термциклов; (б) после 10 термциклов

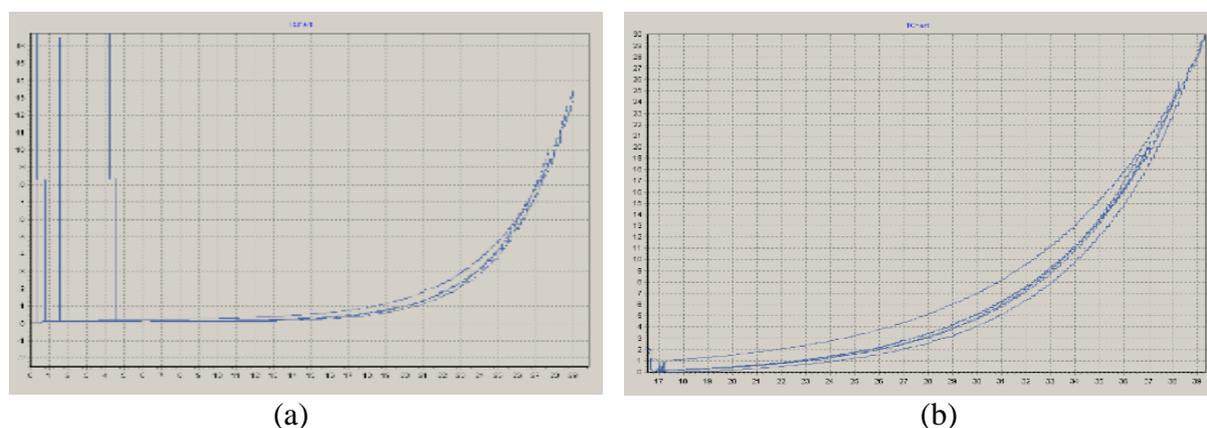


Рис. 11. Вид типичных исходных зависимостей силы левитации (в кгс по оси y) от расстояния трасса ВТСП (в мм по оси x) до проведения обработки результатов эксперимента

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:

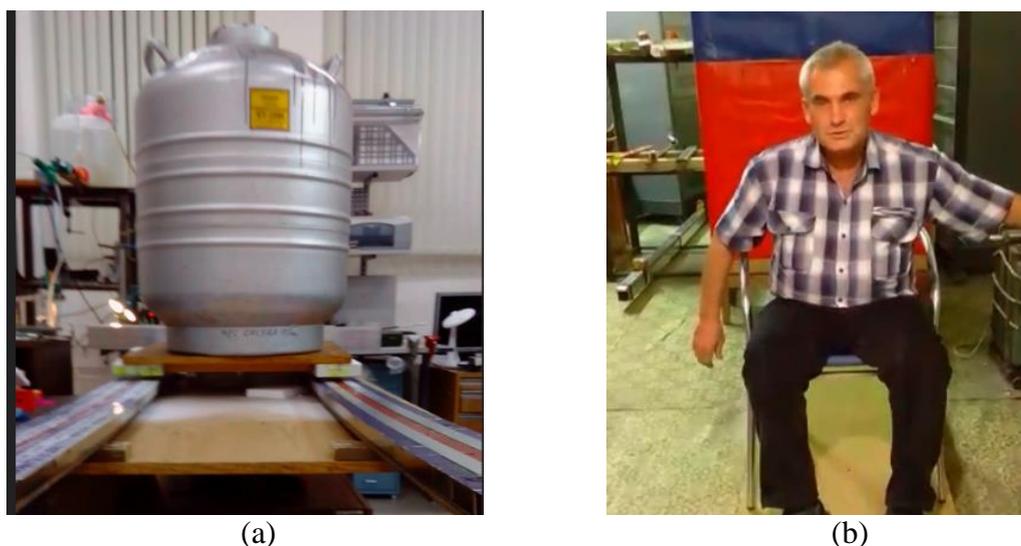


Рис. 13. Левитер: (а) грузовой вариант; (б) пассажирский вариант

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.

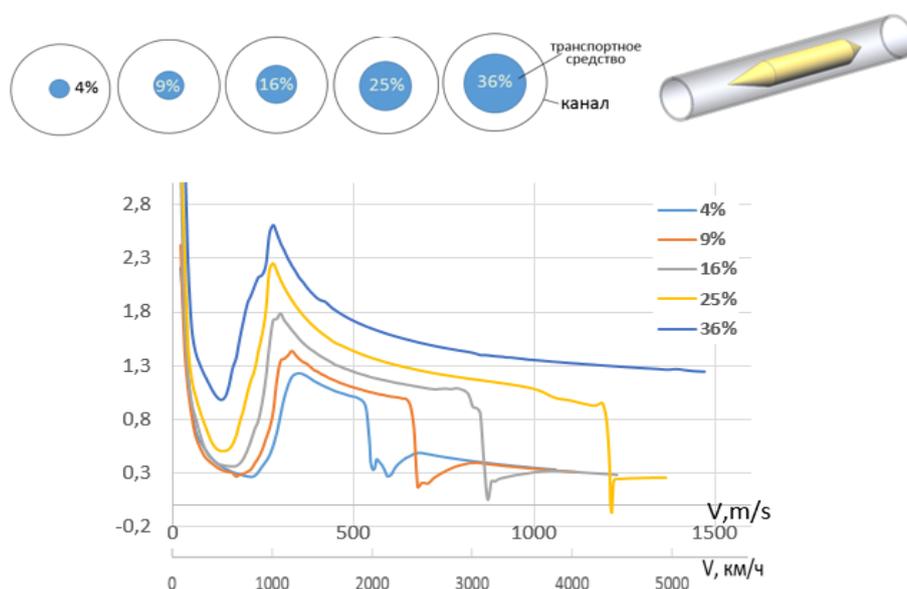


Рис. 14. Кривые зависимостей коэффициента аэродинамического сопротивления транспортного средства от скорости движения

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.

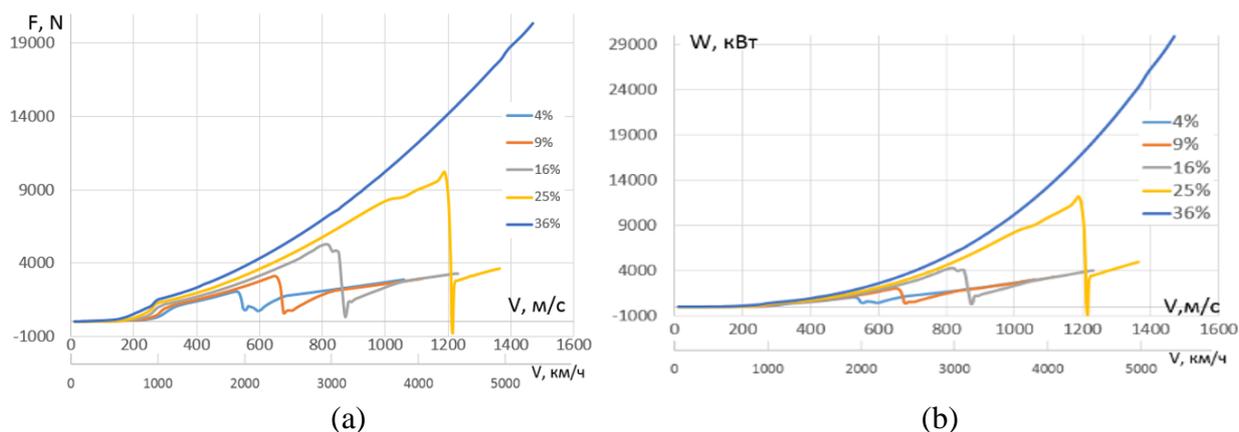


Рис. 15. Ожидаемые (а) аэродинамическое сопротивление транспортного средства и (б) требуемые мощности на его преодоление

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	U <sub>т.</sub> , м/с	U <sub>экс.</sub> , 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, U<sub>т.</sub> – теоретическая скорость тела на выходе из ствола, U<sub>экс.</sub> – скорость тела на выходе из ствола полученная в эксперименте, Δ = U<sub>т.</sub> - U<sub>экс.</sub>

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.

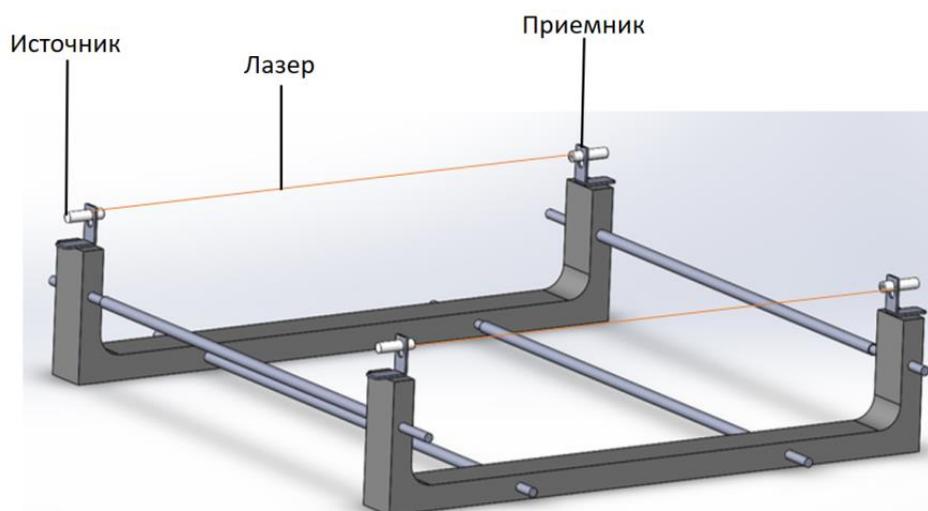


Рис. 17. 3D модель оптической системы

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:

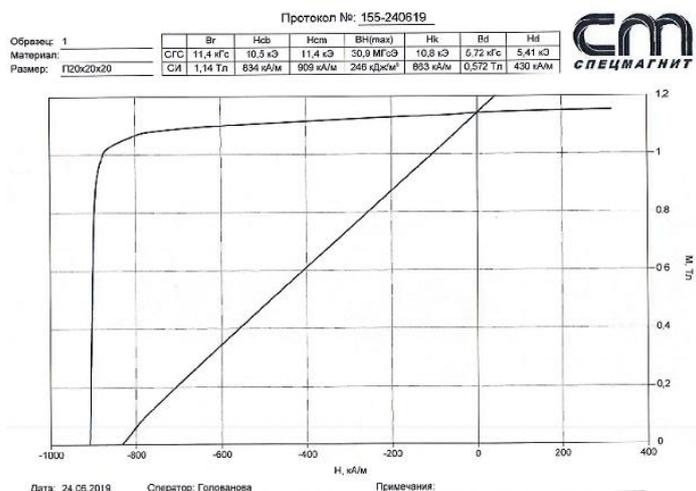


Рис. 20. Пример получаемых параметров исходных магнитов

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, Poltavec VN, et al. Elektricheskie mashiny i ustrojstva na osnove massivnyh vysokotemperaturnyh sverhprovodnikov. Kovalyov LK, Kovalyov KL, Koneev SM-A, editors. 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