

Подготовка экспериментальной базы и результаты начального этапа экспериментальной отработки критических элементов технологии ИТТС России на базе ВМЛТ-Вакуумного магнито-левитационного транспорта

Ю.А. Терентьев, *В.В. Коледов, **Р.И. Ильясов, *Н.А. Нижельский, ***М.С. Сысоев,
****В.М. Фомин, **Д.Г. Наливайченко, *****В.Л. Моисеенко, *****В.В. Точило,
*****П.А. Бражник**

Независимый эксперт, Москва;

***ИРЭ им. В.А. Котельникова, РАН, Москва;**

****МАИ им. Орджоникидзе, Москва;**

*****МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва;**

******ИТПМ им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск;**

*******ЦИП «Квинтэссенция:Тех», Москва; *****НИЦ «Курчатовский институт», Москва
E-mail: teren_y@mail.ru**

Современная структура экономики, имеющая глобальный характер производственных, предпринимательских и рыночных связей, во многом обеспечивается транспортно-логистическими системами. Развитие транспортных систем позволяет значительно оптимизировать качество взаимодействия между различными участниками экономических отношений, а также сократить издержки.

Российская Федерация, как один из лидеров поставок различных типов сырья на мировые рынки, а также страна, обладающая значительным транзитным потенциалом в рамках евразийского пространства, для обеспечения глобальной конкурентоспособности экономики должна поддерживать транспортно-логистическую инфраструктуру на современном уровне [1-5].

Транспортно-логистические системы, разрабатываемые на основе технологий вакуумных магнито-левитационных технологий, обладают сегодня необходимыми свойствами для создания необходимого потенциала, как в части реализации транзитно-транспортного потенциала (ТТП), так и в рамках развития внутренних экономических отношений.

Представленный ниже подход по формированию Интегральной Транзитной Транспортной Системы Российской Федерации (ИТТС), позволяет обеспечить комплексное, системное развитие транспортно-логистической инфраструктуры страны, а также создать эффективные средства развития внутренних и внешних экономических связей и сформировать новые передовые и прорывные технологии и производственные мощности с развитием смежных отраслей науки и техники. Приведены краткие предварительные результаты начального этапа экспериментального моделирования и отработки основных критических составляющих технологии ВМЛТ.

Preparation of the experimental base and the results of the initial stage of experimental testing critical elements of ITTS technologies in Russia, which are based on VMLT -Vacuum Magneto-Levitation Transport. Y.A. Terentiev, V.V. Koledov, R.I. Iliysov, N.A. Nijelskiy, M.S.Sysoev, V.M. Fomin, D.G. Nalivaichenko, V.L. Moiseenko, V.V. Tochilo, P.A. Brajnik. The modern economic structure, which has global production, business and market linkages, is greatly facilitated by transport and logistics systems. The development of these systems allows to optimize the quality of interaction between the participants of economic relations and reduce costs.

Being among the leaders in supplying the world market with different types of commodities and having significant transit potential within the Eurasian space, the Russian Federation must maintain a modern transport and logistics infrastructure in order to ensure global competitiveness of the economy [1-5].

Transport and logistics systems, being developed on the basis of vacuum magnetic levitation technology, have all capabilities to create the necessary cooperation, both in terms of transit and transportation (TTP) and in the development of domestic economic relations.

The following approach to form the Integrated Transit Transport System (ITTS) in Russia makes comprehensive systematic development of the transport and logistics infrastructure of the country possible, as well as creates effective means of development the internal and external economic relations, forms new advanced and breakthrough production facilities within the development of related industries of science and technology. Here the brief preliminary results of the initial stage of the experimental modeling and the results of testing the main critical components of the technology of VML are given.

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. [6].

При этом следует учесть, что реализация любого транспортного проекта всегда тесно связана и взаимообусловлена развитием другого проекта – энергетического. Проекты транспортный и энергетический 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). [7].

Таким образом проблема экономии энергии и энергосбережение 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.

Понятно, что в первую очередь напрямую в сохранении такого перевозочного статуса заинтересованы США и Великобританией [8], в той или иной степени контролирующей мировую океанскую и морскую перевозку грузов.

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 [9].

Китай, как одна из крупнейших экономик Мира, формирует диверсифицированный подход к импорту сырья и экспорту собственных товаров, – концепт нового «Шелкового пути» [10], – как для повышения экономической эффективности собственных компаний, так и для обеспечения собственной транспортно-логистической безопасности.

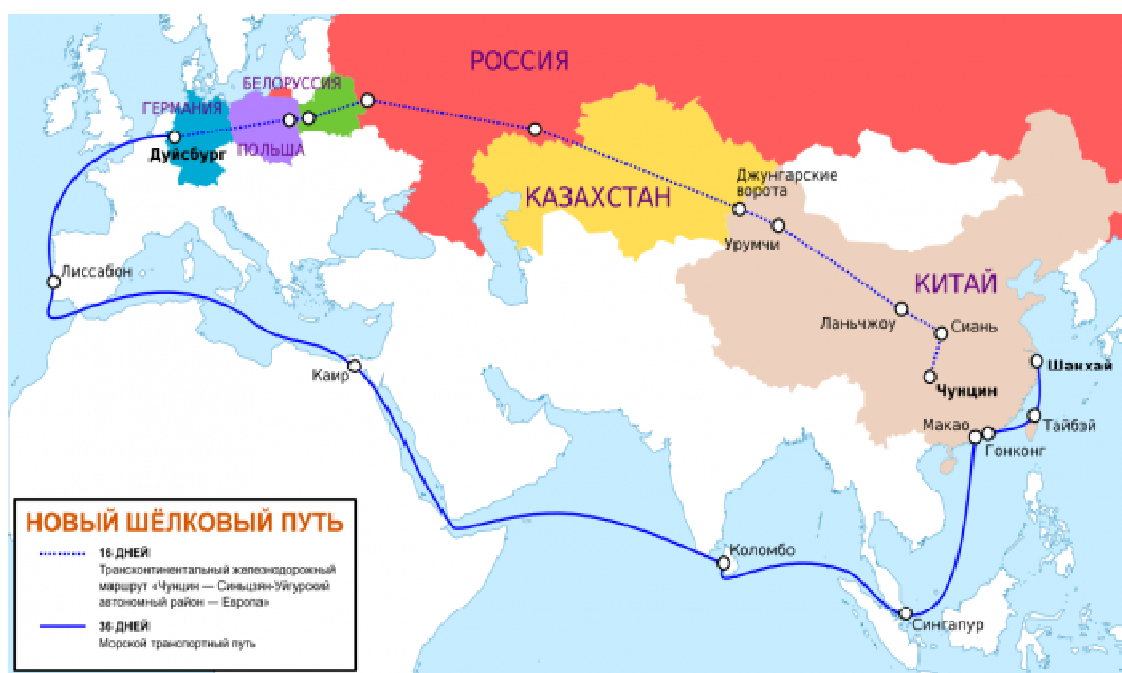


Рис. 1. Схема основных транспортных потоков Экономического Пояса Шелкового Пути (ЭПШП) [11].

1. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Современная экономика грузоперевозок строится на расчётах по транспортировке груза, эквивалентного одному стандартному двадцатифутовому контейнеру (1 TEU) [12].

В рамках поставок грузов пока наиболее оптимизированным выглядит железнодорожная поставка, которая, несмотря на непомерно высокие энергетические затраты на перевозку, потенциально, всё-таки имеет меньшие сроки поставки (до 16 дней по ЭПШП), в сравнении с Южным морским коридором (см. рисунок 1).

В части железнодорожных перевозок по маршруту Юго-восточная Азия – Европейский Союз тарифы на перевозку TEU колеблются в пределах \$ 2200 – \$ 3000. По данным на 2018 год, объём перевозок составил порядка 250 тысяч TEU. Аналитики считают, что потенциал существующего рынка контейнерных перевозок может обеспечить рост до 500 тысяч TEU уже в 2020 году и потенциал дальнейшего развития контейнеропотока по оси Китай — ЕАЭС — ЕС может составить порядка 2 млн TEU в год [13].

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 [14].

Примером эффективного построения новых транспортных и логистических систем является деятельность компании Amazon (США) [15], и он доказывает оправданность и эффективность развития новых технологических решений, в данном случае на основе таких же беспилотных, как и у ВМЛТ, технологий.

2. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Технологические пределы энергетически приемлемой скорости развития традиционного железнодорожного транспорта, по мнению экспертов, составляют не более 500 – 600 км/ч [16]. И одними из наиболее перспективных решений в области развития высокоскоростных технологий транспортно-логистических систем представляются проекты в области атмосферного (АМЛТ) и вакуумного магнитно-левитационного транспорта (ВМЛТ). [1-5, 17-22].

В ряде стран, в том числе и в России, сегодня осуществляется лабораторная отработка базовых принципов АМЛТ и ВМЛТ [2, 3, 5, 17-18, 22-27].

Так, нашими коллегами - сотрудниками 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 (Рис.2).



Рис 2. Действующая модель МАИ "атмосферного" МЛТ (слева) и магнитный ВТСП подвес грузоподъемностью 500 кг (справа)[27]

Данные методики также пригодны и для прямого использования этих результатов при расчётно-экспериментальном моделировании элементов и технологий вакуумного магнито-левитационного транспорта - ВМЛТ.

В соответствии с ними, основание трассы ВТСП подвеса включает бесконечно длинный ненасыщенный ($\mu_{Fe} \rightarrow \infty$) ферромагнитный магнитопровод, через который замыкается магнитное поле одного или нескольких постоянных магнитов (ПМ), расположенных на нем и разделенных проставками из немагнитного материала.

Над поверхностью ПМ левитирует криостат с ВТСП элементами. Расчет электромагнитных полей и сил левитации в подобных магнитных ВТСП опорах, в значительной степени определяемых их конфигурацией и сводится к решению обобщенной задачи Неймана – Дирихле .

При этом используются следующие допущения. Считается, что длина основания магнитного подвеса много больше его поперечных размеров, что позволяет перейти к двумерной постановке соответствующих электродинамических задач. Принимается, что свойства ПМ полностью определяются магнитным моментом \vec{M} , вектор которого коллинеарен вертикальной оси y и постоянен по объему магнита ($\vec{M}(M_x, M_y) = \vec{M}(0, M_0)$, $M_0 = const$)

Структура массивного ВТСП элемента считается однодоменной (монокристаллической). В этом случае процессы динамического взаимодействия ПМ и ВТСП элемента будут определяться плотностью транспортных критических токов J_s . Принимается, что толщина биновских токовых слоев δ мала по сравнению с поперечными размерами L элемента L . Поэтому с точностью до члена порядка $\delta \ll 1$ реальное распределение критических токов в ВТСП элементе можно заменить эквивалентным поверхностным током I_s . Это существенно упрощает постановку соответствующих электродинамических задач и методы их решения. Реальное распределение критических токов в биновских слоях можно восстановить на последующих этапах расчета по известным (например, из эксперимента) значениям касательной составляющей магнитного поля на границе ВТСП элемента.

Можно показать, что идеальное ферромагнитное полупространство с $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$, по существу представляет собой "ферромагнитное зеркало", в котором отражаются поля магнитов [26]. Поэтому расчет магнитных полей, создаваемых ПМ в верхней полуплоскости исходного ВТСП подвеса с магнитопроводом, сводится к расчету поля от одного или нескольких ПМ удвоенной толщины в свободном пространстве. Решение последней задачи в силу линейности сводится к решению двумерной задачи Зоммерфельда для одного магнита с последующим

наложением решений для заданной системы магнитов. После преобразований можно получить следующую итоговую систему уравнений для напряжённости магнитного поля H и магнитной индукции B :

$$\left. \begin{aligned} H_x(x, y) &= \frac{-M_0}{4 \cdot \pi} \cdot \left(\ln \left[(x-L)^2 + (y-b)^2 \right] - \ln \left[(x-L)^2 + (y+b)^2 \right] - \right. \\ &\quad \left. - \ln \left[(x+L)^2 + (y-b)^2 \right] + \ln \left[(x+L)^2 + (y+b)^2 \right] \right) \\ H_y(x, y) &= \frac{-M_0}{4 \cdot \pi} 2 \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{x-L}{y-b} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{x-L}{y+b} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \operatorname{arctg} \left(\frac{x+L}{y-b} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{x+L}{y+b} \right) \right] \\ B_x &= \mu_0 \cdot H_x; & B_y &= \mu_0 (H_y + M). \end{aligned} \right\}$$

Расчет магнитных полей для системы из двух и более ПМ проводится методом суперпозиций решений данной системы уравнений, сдвинутых вдоль оси x на соответствующие расстояния c центров ПМ от геометрической оси симметрии системы. Так для системы из двух ПМ и трех ПМ решения для функции магнитного потока A_{Σ} записываются соответственно:

$$\begin{aligned} A_{\Sigma} &= A(x+c, y) - A(x-c, y), \\ A_{\Sigma} &= A(x, y) - A(x+c, y) - A(x-c, y). \end{aligned}$$

Представленные распределения являются исходными для аналитического расчета сил левитации в магнитном ВТСП подвесе.

На рис 3 представлен образец результата характерных расчётов, проведенных по этой методике для реальной инновационной конфигурации трассы из постоянных РЗМ магнитов на основе NdFeB, открывающей конкретные предпосылки для организации и исследования более оптимального одновременного сочетания сил и вертикальной и боковой стабилизации при движении модели капсулы ВМЛТ над трассой из комбинации подложки, немагнитных дистанционирующих прокладок и постоянных РЗМ NdFeB.

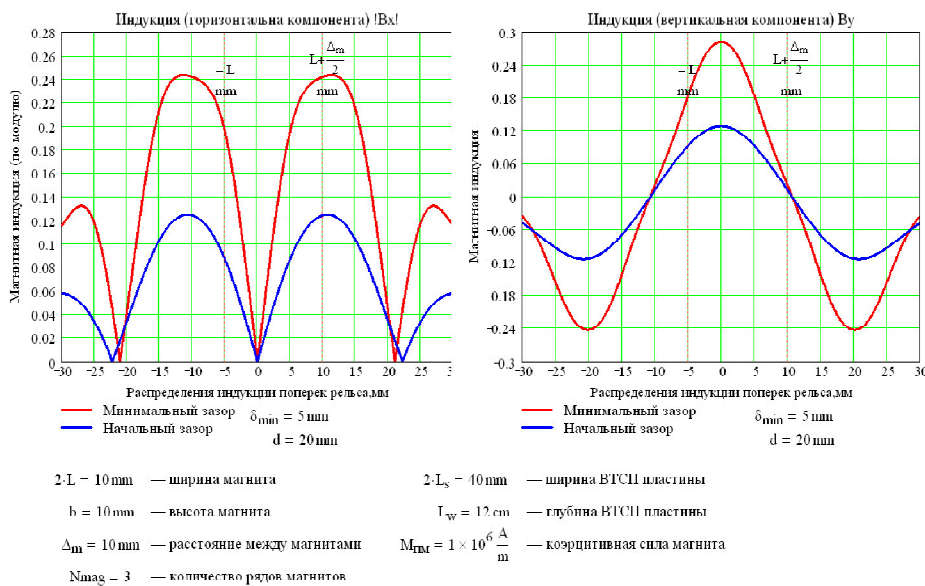


Рис 3. Результаты расчёта конфигурации магнитного поля (в Тл по оси yy в мм. по оси x) над рабочей поверхностью одного из макетов трассы ВМЛТ.

Для последующего сопоставления результатов расчёта и эксперимента, анализа и возможной адаптации и корректировки методики 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, на автоматизированной установке трёхмерной Холловской магнитометрии, Рис. 4

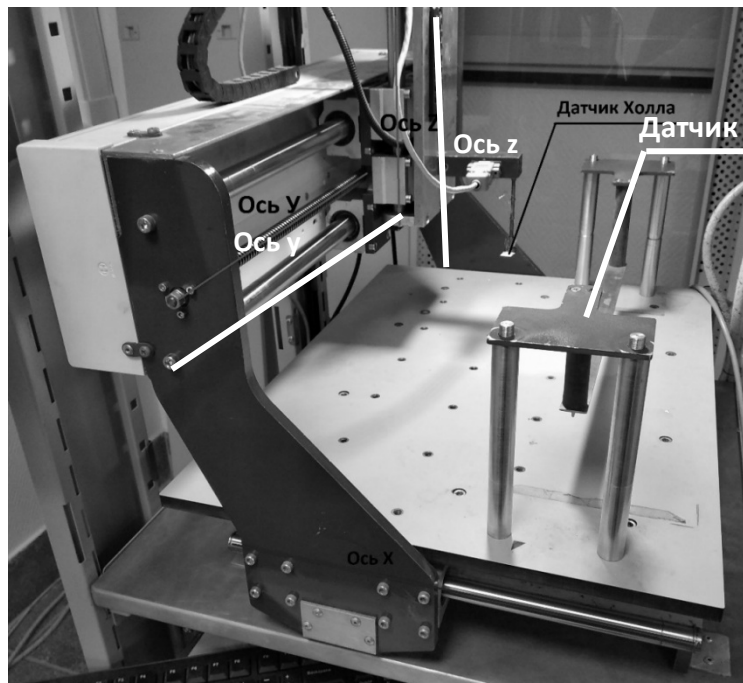


Рис. 4 Автоматизированная установка трёхмерной Холловской магнитометрии.

были проведены тестовые измерения топологии 3D магнитного поля специально выделенного единичного фрагмента магнитолевитационной трассы (а) и тестового единичного магнита NdFeB (b), результаты которых приведены на Рис 5, также в качестве примера получаемых на установке результатов.

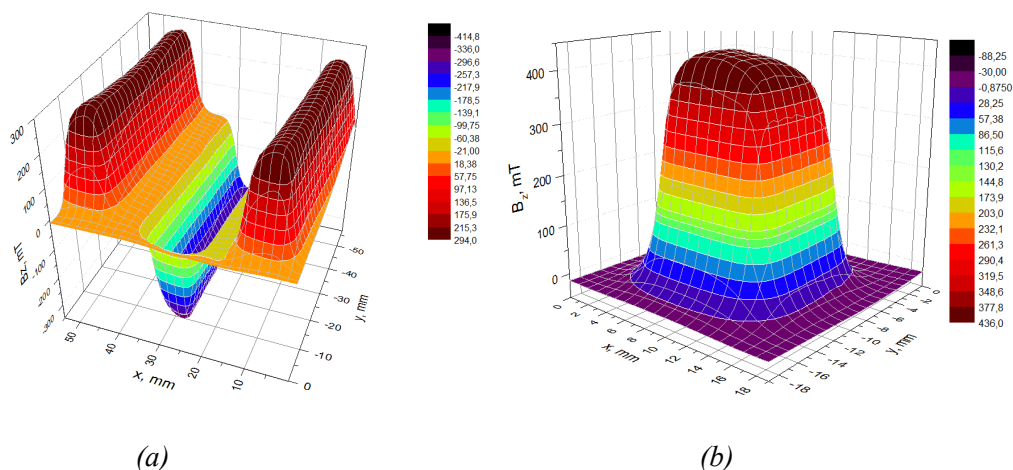


Рис 5. Примеры результатов измерения топологии магнитного поля трассы (a) и единичного магнита (b).

Так как в наших экспериментах пока использовались неаттестованные 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 рисунке 5.1 и 5.2.

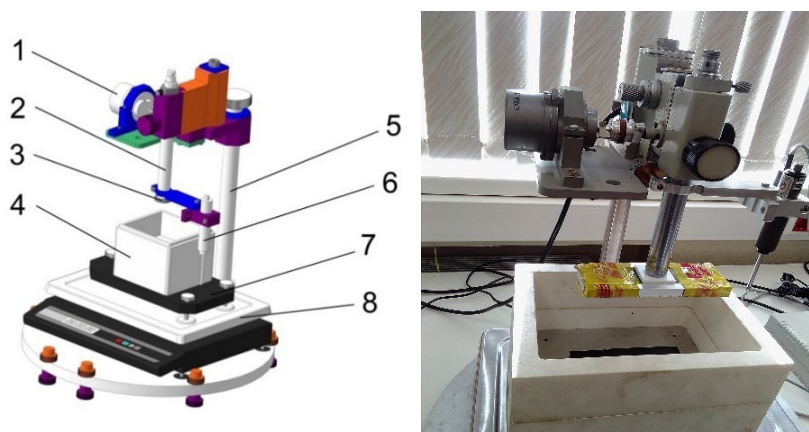


Рис 5.1 и 5.2. – схема и фотография устройства для измерения сил левитации 1-редукторный двигатель, 2- шток, 3- фрагмент трассы из постоянных NdFeB магнитов, 4 - теплоизолированная кювета, 5 –стойка, 6 – датчик перемещения, 7 – тяжелое основание, 8 – электронные весы.

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,[3,5] 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 (рисунки 6.1, 6.2, 6.3).

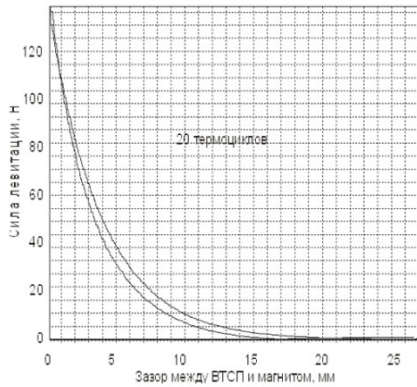


Рис. 6.1.- Зависимость силы левитации от расстояния для образца после 20 термоциклов.

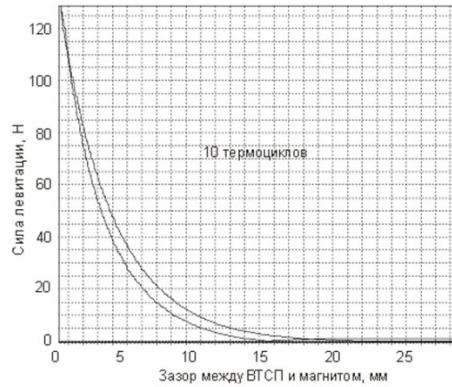


Рис. 6.2. - Зависимость силы левитации от расстояния для образца после 10 термоциклов.

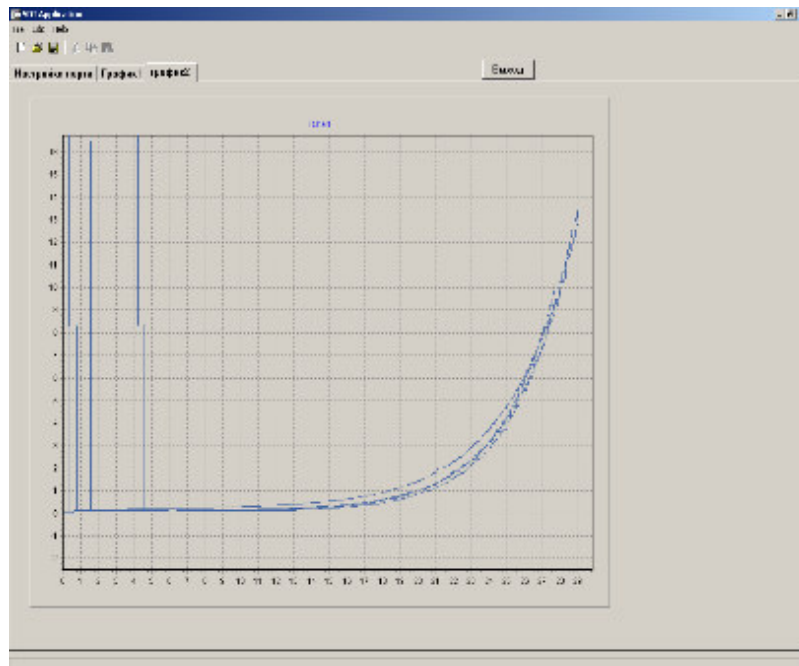


Рис. 6.3. Вид типичной исходной зависимости силы левитации (в кгс по оси y), от расстояния трасса-ВТСП, (в мм по оси x) до проведения обработки результатов эксперимента.

Параллельно, коллегами из ИПТМ СО РАН, как и планировалось нами ранее, [5], проведены расчётно-экспериментальные работы по моделированию процессов термоаэродинамики элементов ВМЛТ [28,29], 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 трубопроводе 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-трубопровода ($\varnothing 100$ мм) пристыковывается к соплу аэродинамической установки. Выход канала, патрубком ($\varnothing 200$ мм), соединяется с вакуумной ёмкостью объемом 220 м³. Принципиальная схема эксперимента и общий вид экспериментального стенда приведены на рис. 7.

Для проведения испытаний была изготовлена модель транспортного средства ($\varnothing 70$ мм) с встроенными двухкомпонентными тензовесами.

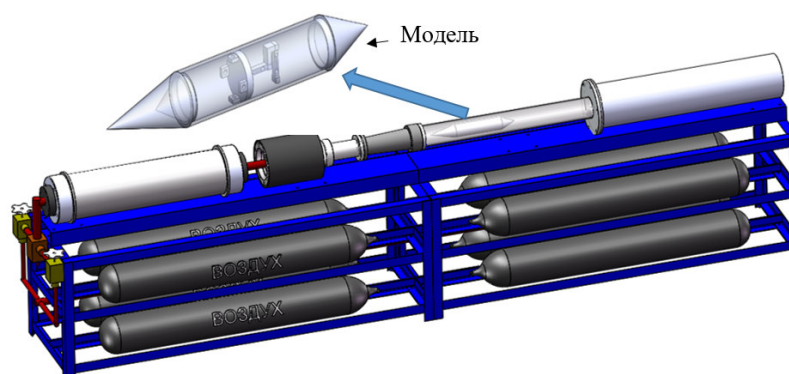


Рис. 7. Принципиальная схема эксперимента.

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 осесимметричной 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.8, для различных геометрических вариантов, представлены зависимости, 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.

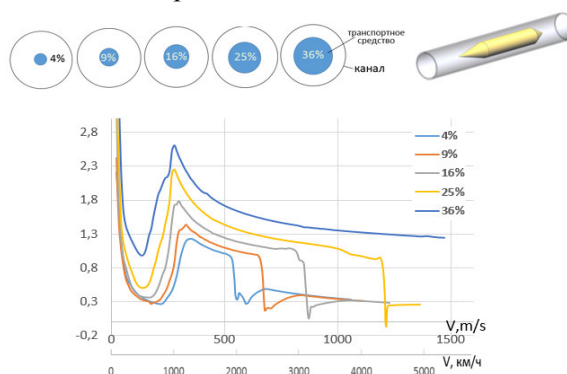


Рис.8. Кривые зависимостей коэффициента аэродинамического сопротивления транспортного средства от скорости движения

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 метра,

На рисунках 9 и 10 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.

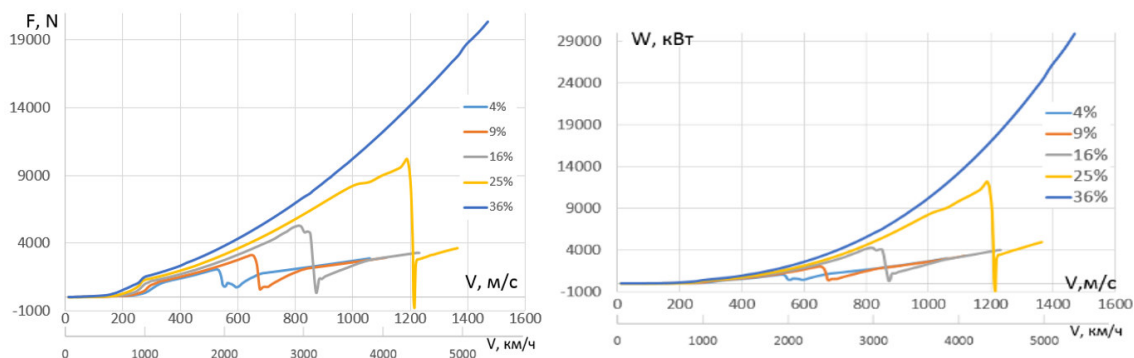


Рис. 9 Аэродинамическое сопротивление транспортного средства.

Рис. 10 Мощность привода необходимая для преодоления аэродинамического сопротивления.

Полученный результат наглядно демонстрирует, что для условий программы, например, «Hyperloop», необходимость снижения энергетических затрат на преодоление аэродинамического сопротивления требует существенного увеличения размеров путепровода в поперечном сечении. Так, для транспортного средства диаметром 1.3 метра, наименьшие затраты энергии из полученных соответствуют путепроводу диаметром 6.5 метров. Наибольшие затраты энергии соответствуют путепроводу диаметром 4.7 метров.

По предварительным оценкам, стоимость путепровода имеет кубическую зависимость от его диаметра. Очевидно, что необходимо работать при значительно, на порядки величины более низких, характерных именно для технологии ВМЛТ, давлениях.

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, рис. 11.

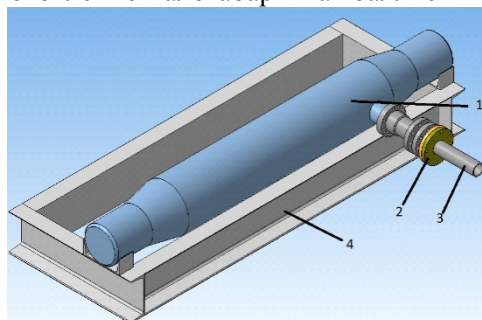


Рис. 11. Схема основных элементов установки.

Установка состоит из четырех основных частей (рис.11), а именно: ресивера (1), пускового механизма (2), ствола (3), поддерживающей рамы (4) и улавливателя. Ресивер представляет собой баллон объемом 0,08 м³, оснащенный клапаном для подачи газа и манометром для контроля давления. Истечение из ресивера происходит через выходное отверстие, которое соединяется с пусковым механизмом через уплотнительную линзу. Внутренний диаметр выходного отверстия ресивера 60 мм. Далее следует пусковое устройство (см. рис 12), задача которого удерживать модель с поддоном и, в нужный момент, освободить от захвата. К пусковому устройству пристыковывается ствол.

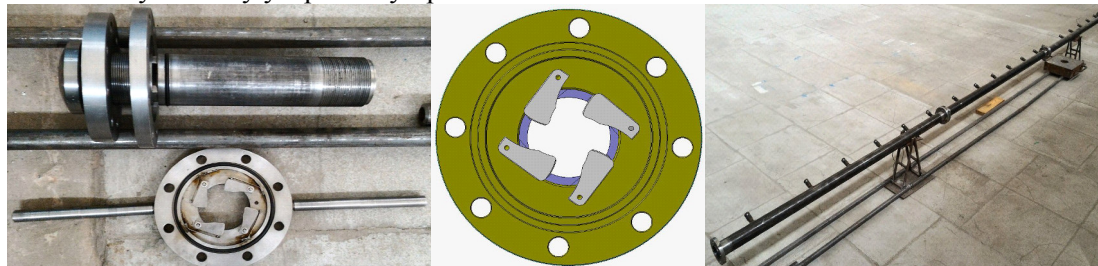


Рис.12. Пусковое устройство, пусковой механизм и ствол на опорах.

Ствол состоит из трех секций длиной 1,5 м и внутренним диаметром 50мм, 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 (рис. 13).



Рис. 13. Оптический рамочный хронограф.

Данный хронограф может регистрировать скорость в диапазоне от 15 до 3000 м/с, при этом относительная погрешность измерения скорости составляет 0,5 %.

В настоящее время, на баллистической установке проведены предварительные, калибровочные эксперименты при скорости разгоняемой модели до 400 метров в секунду (1440 км/час.).

Серия испытаний включала ускорение тел массой $m \approx 100 \div 115$ гр. 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 таблице 1.

Таблица 1

№	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. 14 и рис. 15 представлены фотография системы и 3D модель.

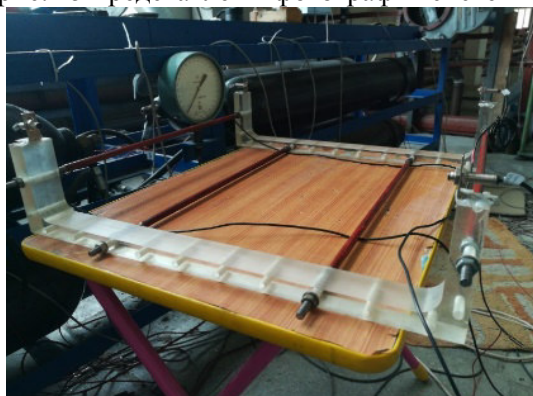


Рис. 14. Фотография оптической системы.

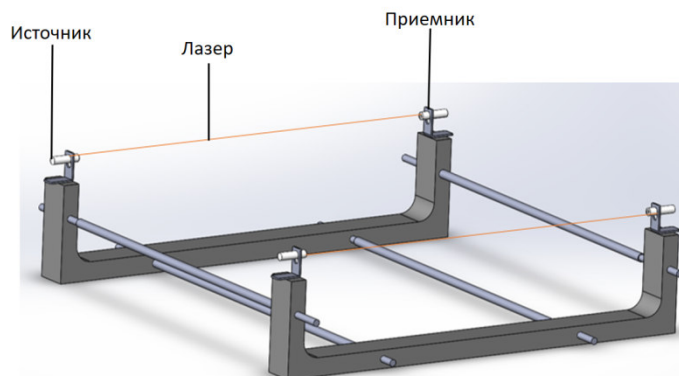


Рис. 15. 3D модель оптической системы.

Принцип действия системы прост: 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 [26,27] предпринята успешная попытка создания экспериментального «потешного», маломасштабного макета участка ВМЛТ на основе редкоземельных магнитов (РЗМ) NdFeB и высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) на основе керамики Y-Ba-Cu-O, [2,3,5] (рис.16.).

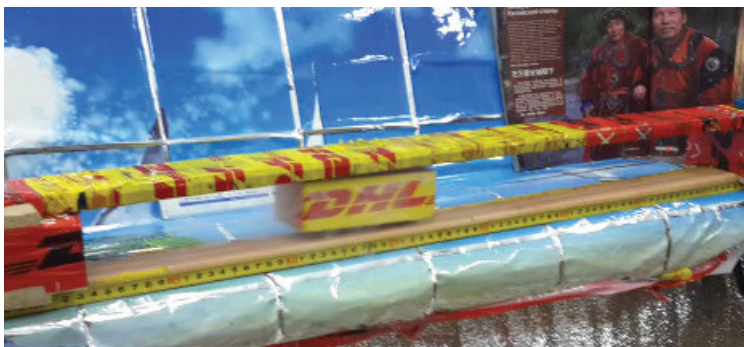


Рис.16. Фрагмент испытательного стенда ВМЛТ на территории ИРЭ,

Макеты исследуемых на нём различных вариантов 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. 17. 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 по основным критическим технологическим параметрам модельного ВМЛТ следующего поколения.

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 криостатирования ВТСП на уровне температур (60-100) К с КПД на уровне (15-25)% от цикла Карно, немагнитные и работающие в вакууме до 10^{-7} Па системы 3d позиционирования и т.д., 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 [5], 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».

Работа поддержана РФФИ, грант 17-20-04236 и АО «КРИОГЕНМОНТАЖ», www.cryomont.ru.

Литература

1. Дроздов Б.В., Терентьев Ю.А. Перспективы вакуумного магнито-левитационного транспорта// Мир транспорта. 2017. Т.15, №1, с.90-99.
2. 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.
3. Филимонов В.В., Малинецкий Г.Г., В.С.Смолин 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.
4. Lyovin V.A., Davydov A.M., Kurenkov P.V., Karapetyants I.V., Shavrov V.G., Koledov V.V., Fongratovski S.V., Malinetskiy G.G., Kryukov P.V., Drozdov B.V., Terentiev Yu.A. 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// The 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications. Osaka, Japan, 2017.
5. Terentyev YA, 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/transsyst201843s157-84
6. Журавлева Н.А., Панычев А.Ю. Проблемы экономической оценки скорости в транспортно-логистических системах в новом технологическом укладе// Транспортные системы и технологии. 2017. Выпуск 4(10). <http://www.transsyst.ru/410-17-7.html>
7. Дроздов Б.В. О перспективном облике глобальной транспортной системы // Сборник "Культура. Народ. Экосфера", труды социокультурного семинара имени Бугровского. Выпуск 10. -М.: "Спутник+", 2017
8. Портал InfraNews: Рейтинг TOP-50 мировых логистических компаний. URL <http://infranews.ru/novosti/statistic/41382-rejting-top-50-mirovyyx-logisticheskix-kompanij/> (дата обращения 20.02.2019).
9. Альметова З. В. и др. ИНТЕГРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ЕВРАЗИЙСКОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОЮЗА //Экономика и менеджмент. – 2019. – Т. 12. – №. 3. – С. 161-168.
10. Yang C., Lan S., Tseng M. L. Coordinated development path of metropolitan logistics and economy in Belt and Road using DEMATEL–Bayesian analysis //International Journal of Logistics Research and Applications. – 2019. – Т. 22. – №. 1. – С. 1-24.

11. Никитин Н. А. ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОРГАНИЗАЦИИ МЕЖДУНАРОДНЫХ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК //European Scientific Conference. – 2019. – С. 74-76.
12. ИА REGNUM: ожидается взрывной рост контейнерного транзита Китай — ЕАЭС — Евросоюз. URL.<https://regnum.ru/news/2396956.html> (дата обращения 10.03.2019).
13. Вертинская Т. Теоретические и практические основы экономической интеграции регионов стран–членов ЕАЭС (на примере участия Республики Беларусь). – Litres, 2019.
14. Трофимова Валентина Владимировна Развитие интернет-торговли в России и мире // Бизнес-образование в экономике знаний. 2018. №2 (10). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-internet-torgovli-v-rossii-i-mire> (дата обращения: 17.03.2019)
15. Журнал Forbes: Amazon стала крупнейшей компанией в мире по капитализации. URL <https://www.forbes.ru/tehnologii/369929-amazon-stala-krupneyshey-kompaniey-v-mire-po-kapitalizacii> (дата обращения: 17.03.2019)
16. Магнитолевитационная транспортная технология / Под ред. В. А. Гапановича. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с.
17. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения /Под ред. Ю.Ф. Антонова, А.А. Зайцева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 612 с.
18. Зайцев А.А., Морозова Е.И., Талашкин Г.Н., Соколова Я.В. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны: монография. – СПб.: НП-Принт, 2015.– 140 с.
19. Technical-economical comparison ofMaglev and High Speed Systems // The website of theTransportation and Infrastructure
20. Committee.http://archives.republicans.transportation.house.gov/Media/File_110th/Rail/3-20-07-roundtable-Bradydornier.pdf. Датаобращения: 15.07.2018.
21. Островская Г.В. Магнитные дороги профессора Вейнберга (К 100-летию лекции «Движение без трения»). ВестникнаукиСибири. 2014. – № 2 (12).
22. ET3 online education // The website of the Evacuated Tube Transport Technology. URL: <http://et3.eu/et3-online-education.html> (дата обращения: 15.03.2019)
23. С.Б.Нестеров, Р.О.Кондратенко, А.И.Капитоненко, А.И.Холопкин, А.Н.Белоконев. Почтовая доставка на основе магнитной левитации в разреженной среде. XXIV Научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» Судака, 16 – 23 сентября 2017 г., стр247
24. Z.Deng, W. Zhang, J. Zheng, B. Wang, Y. Ren, X. Zheng, J. Zhang. A High-Temperature Superconducting Maglev-Evacuated Tube Transport (HTS Maglev-ETT) Test System. IEEE Trans. Appl. Supercond. V. 27, NO. 6, (2017) 3602008.
25. R. X. Sun, J. Zheng, L. J. Zhan, S. Y. Huang, H. T. Li and Z. G. Deng /International Journal of Modern Physics B .Vol. 31 (2017) 1745014.
26. Ковалёв Л.К., Ковалёв К.Л., Конеев С.М-А, Пенкин В.Т., Полтавец В.Н., Ильясов Р.И. Магнитные подвесы с использованием объёмных ВТСП элементов. //Электронный журнал «Труды МАИ», Выпуск №38.
27. Л.К. Ковалёв, С.М. Конеев, В.Н. Полтавец, М.В. Гончаров, Р.И. Ильясов, Д.С Дежин. Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников / Под ред. Л. К. Ковалёва., К. Л. Ковалёва, С.М-АКонеева .- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 396 с.
28. Фомин В.М., Звегинцев В.И., Наливайченко Д.Г., Терентьев Ю.А. Вакуумный магнитолевитационный транспорт: поиск оптимальных рабочих параметров// Транспортные системы и технологии. 2016, вып.(3)5. <http://www.transssyst.ru/4-razdel1-2-Fomin.html>
29. V.I. Zvegintsev, S. O. Morozov, and D. G. Nalivaychenko. Gas dynamics of the uniform body acceleration in the channel// AIP Conference Proceedings 2027, 030012 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5065106>