

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МАГНИТО-ЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

Д. А. Карпухин^{1,2}, А. О. Петров^{1,2}, В. В. Коледов^{1,2}, Д. А. Суслов^{1,2}, В. Г. Шавров¹,
Ю. А. Терентьев^{1,2}, С. В. Фонгратовски^{1,2}, И. В. Герман^{1,2}, Э. Т. Дильмиева^{1,2},
А. П. Каманцев^{1,2}, В. С. Ларюхин^{2,3}, А. В. Бабачанов^{2,4}, В. К. Балабанов^{2,5},
П. В. Куренков⁴, А. В. Камынин⁶, А. В. Самвелов⁷, С. Г. Ясев⁷,
Г. Г. Малинецкий⁸, М. А. Сысоев³, С. В. Шилло³, Н. А. Нижельский³,
П. С. Бражник⁹, Т. С. Зименкова¹⁰, Б. В. Дроздов¹¹, К. Л. Ковалев¹²,
В. Н. Полтавец¹², Р. И. Ильясов¹², А. А. Сафонов¹³,
Д. К. Палчаев¹⁴, Д. В. Иванов¹⁵, К. Ю. Яковлев¹⁵

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7

² Научно-технический университет Сириус, 354340, Сочи, Олимпийский проспект 1

³ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская 5

⁴ РУТ(МИИТ), 127994, Москва, ул. Образцова 9, стр. 9

⁵ Самарский национальный исследовательский университет им. Академика С.П.
Королева, Самара, 443086, Московское шоссе 34

⁶ АО «Спецмагнит», 127238, Москва, Дмитровское шоссе 58

⁷ АО ОКБ «АСТРОН», 14080, Московская обл., г. Лыткарино, ул. Парковая 1

⁸ ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 125047, Москва, Миусская пл. 4

⁹ НИЦ Курчатовский институт, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова 1

¹⁰ Петербургский государственный университет путей сообщения,
190031, Санкт-Петербург, Московский проспект 9

¹¹ Институт Информационно-аналитических технологий,
119571, Москва, проспект Вернадского 86

¹² Московский Авиационный Институт (МАИ), 125993, Москва,
Волоколамское шоссе 4

¹³ АО «Нева Технология», 192007, Санкт-Петербург, ул. Тамбовская 13

¹⁴ Дагестанский Государственный Университет,
367000, Махачкала, ул. М. Гаджиева 43-а

¹⁵ ООО «Лазеркат», 119034, Москва, переулок Чистый 3

Статья поступила в редакцию 23 августа 2021 г.

Аннотация. Изучение и внедрение инновационных систем экологически чистого и энергетически экономичного транспорта на основе магнитной левитации, принцип работы которой основан на применении новых

твердотельных магнитных материалов, основанных на соединениях редкоземельных материалов, в частности материалов с высокотемпературной сверхпроводимостью на основе Y, постоянных магнитов на основе Nd и Sm и магнитокалорических сплавов на основе Dy, Tb вызывает большой интерес во всем мире. В данной работе экспериментально на макетах изучены основные принципы магнито-левитационной транспорта с наиболее экономичным принципом разгона и торможения – гравитационным. Измерены силовые характеристики: сила левитации и сила боковой стабилизации, а также потери при периодическом поступательном движении криостата с высокотемпературными сверхпроводниковыми элементами из керамического материала YBaCuO над трассами из линеек постоянных магнитов из редкоземельного соединения NdFeB. Создана и испытана система измерения скорости и компенсации потерь для осуществления незатухающего движения. Представленные результаты свидетельствуют о возможности масштабирования макетного проекта. Сделан вывод о том, что исследованная схема может представлять практический интерес для внутригородского и локального транспортного сообщения с высоким комфортом, экологичностью и рекордной экономичностью в случае успешного решения проблемы охлаждения элементов ВТСП до температуры фазового перехода в сверхпроводящее состояние, например, с применением новых принципов твердотельного магнитного охлаждения на основе соединений DyN, TbNi и др.

Ключевые слова: магнитолевитационный транспорт, ВТСП, YBaCuO, сверхпроводимость второго рода, NdFeB, гравитационный разгон и торможение, DyN, TbNi.

Abstract. Study and implementation of innovative systems of environmentally friendly and energy-efficient transport based on magnetic levitation, the principle of operation of which is based on the use of new solid-state magnetic materials based on compounds of rare earth materials, in particular materials with high-temperature superconductivity based on Y, permanent magnets based on Nd and Sm and magnetocaloric alloys based on Dy, Tb are of great interest throughout the world. In

this work, the basic principles of magneto-levitation transport with the most economical principle of acceleration and deceleration - gravitational - are studied experimentally on mock-ups. The strength characteristics were measured: the levitation force and the lateral stabilization force, as well as losses during periodic translational motion of a cryostat with high-temperature superconducting elements made of ceramic material Y-Ba-Cu-O over the paths of permanent magnets made of the rare-earth compound Nd-Fe-B. A system for measuring the speed and compensation of losses for the implementation of continuous motion has been created and tested. The presented results indicate the possibility of scaling the layout project. It is concluded that the investigated scheme may be of practical interest for intracity and local transport communication with high comfort, environmental friendliness and record economy in the case of a successful solution of the problem of cooling HTSC elements to the temperature of the phase transition to the superconducting state, for example, using new principles of solid-state magnetic cooling based on compounds Dy-N, Tb-Ni, etc.

Key words: magnetolevitation transport, HTSC, Y-Ba-Cu-O, second-order superconductivity, Nd-Fe-B, gravitational acceleration and deceleration, magnetocaloric effect, Dy-N, Tb-Ni.

Введение.

Во всем мире ведутся активные поиски решения задачи создания высокоэкономичных, сверхскоростных транспортных магистралей, однако на сегодняшний день ни одна известная транспортная система, включая авиацию не позволяют достаточно экономично и надежно перевозить грузы и пассажиров на большие расстояния со скоростями, сравнимыми со скоростью звука и выше. Поэтому поиск инновационных решений для сверхскоростных и экономичных линий, в частности, основанных на применении новых твердотельных магнитных материалов и принципов квантовой механики (сверхпроводимости) в области скоростного транспорта актуален и признан перспективным во всем мире [1-5].

Одно из таких решений - магнито-левитационная транспортная система, принцип работы которой основан на использовании явления магнитной левитации высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) второго рода. Над трассой, собранной из постоянных магнитов, охлаждается криостат с элементами состава $YBaCuO$, который служит двигателем транспортного средства. Температура перехода ВТСП в сверхпроводящее состояние примерно равна 93 К, что позволяет охлаждать криостат жидким азотом, температура кипения которого при атмосферном давлении около 77 К. При таком принципе левитации используется не только вертикальная сила левитации, но и сила боковой стабилизации, удерживающая криостат с ВТСП на трассе из линеек постоянных магнитов (ПМ). В [5] описана конструкция и последние результаты испытаний демонстрационной системы транспорта, основанной на указанном принципе. К недостаткам этой и других, уже созданных или проектируемых систем можно отнести недостаточную экономичность, обусловленная необходимостью расхода электроэнергии на разгон и торможение транспортного средства, несмотря на очень низкие потери энергии на крейсерском участке пути. Этому недостатку лишена схема гравитационного разгона и торможения, предложенная в [6]. Принцип гравитационного разгона и торможения давно известен на железнодорожном транспорте и поясняется на рис. 1. Участок старта (финиша) при такой схеме расположен выше на высоту h по уровню, чем прямолинейный крейсерский участок. Таблица на рис. 1 показывает, что скорость, достигаемая на крейсерском участке при сравнительно невысоких значениях h , находится в пределах нескольких десятков км/час, что вполне может представлять практический интерес.

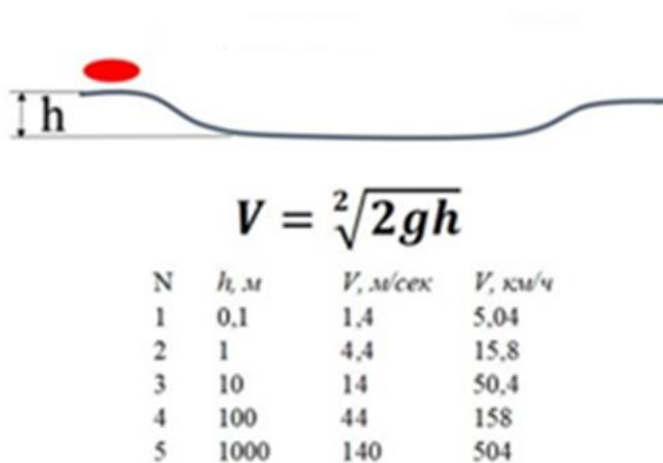


Рис. 1. Гравитационный принцип разгона и торможения магнитолевитационного транспорта.

Цель настоящей работы заключается в изучении на экспериментальных макетах принципа магнитной левитации и гравитационного разгона и торможения магнитолевитационного транспорта, включая измерение потерь при движении, а также возможность масштабирования экспериментального макета и обсуждение возможности применения инновационных методов твердотельного охлаждения для повышения экономичности и технологичности.

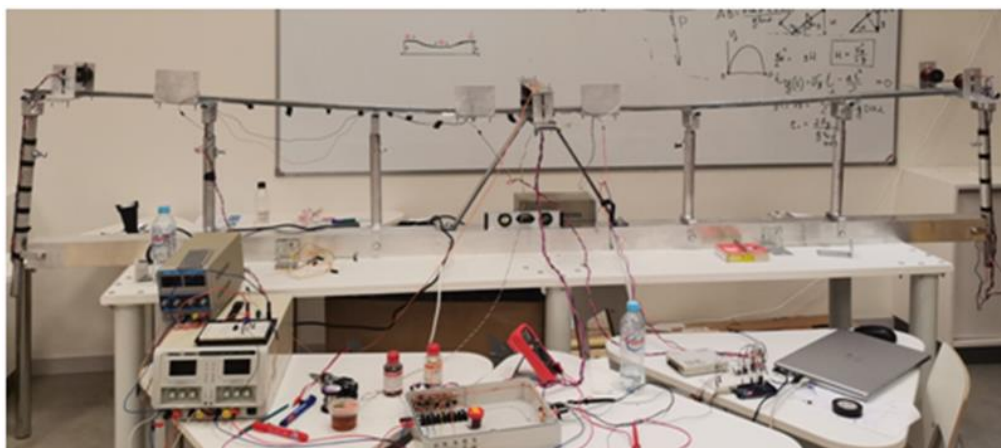
1. Методика эксперимента.

Для изучения принципа магнитной левитации криостата с элементами ВТСП и гравитационного принципа его разгона и торможения создан экспериментальный макет магнитолевитационной трассы с переменным профилем по высоте (см. рис. 2). Трасса имеет длину 3 метра, выполнена из гибкого стальной полосы и снабжена одной неподвижной опорой в центре и шестью телескопическими опорами для регулировки профиля по высоте (см. рис. 2а).

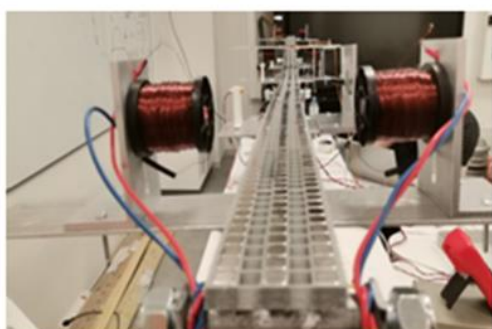
Сама трасса включает расположенные симметрично на всей длине три трехметровые линейки из постоянных магнитов Nd-Fe-B. По бокам трассы, на ее середине, установлены катушки электромагнитов, как показано на рис. 2б, которые служат в качестве элементов системы разгона и торможения криостата. Для этого на криостате по оси электромагнитов расположены небольшие

постоянные магниты. Также вдоль трассы установлены фоторезистивный приемник с одной стороны, а с другой стороны лазерный модуль, луч которого направлен точно в апертуру фотоприемника (рис. 1с). Оптический сенсор позволяет по прерыванию оптического луча определить момент приближения криостата к центру трассы и скорость движения в этот момент.

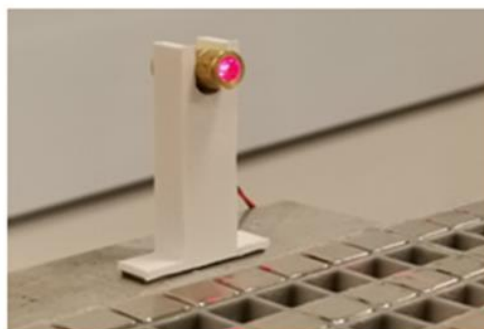
Электронная система управления, позволяет на основе измерения положения и скорости осуществить управляющее воздействие - подачу на катушки импульса электрического тока, соответствующей полярности для торможения или разгона криостата. В том числе, система позволяет установить параметры управляющего импульса тока таким образом, чтобы обеспечить компенсацию потерь и незатухающее колебательное движение криостата.



a



b



c

Рис. 2. Внешний вид экспериментального макета (а), расположение электромагнитных катушек для компенсации потерь при движении (b), лазер сенсора скорости движения криостата (с).

В собранном трехметровом макете трассы были использованы постоянные магниты (ПМ) NdFeB – марки N42 в виде кубиков со стороной $a = 10$ мм (см. рис. 3а), со следующими параметрами: остаточная магнитная индукция – 1280-1320 мТл (12.8-13.2 кГс); коэрцитивная сила – ≥ 955 кА/м (≥ 12 кЭ); магнитная энергия – 318-342 кДж/м³ (40-43 МГс·Э). Сечение трассы в сборе показано на рис. 3б. Сборка осуществлялась в три магнитные линии N-S-N. Магниты располагались в жестком корпусе из распечатанных на 3D принтере пластмассовых сетчатых ячеек, как изображено на рис. 3а. Линейки постоянных магнитов устанавливались на магнитномягкой полосе из стали толщиной $b = 5$ мм и шириной $l = 50$ мм.

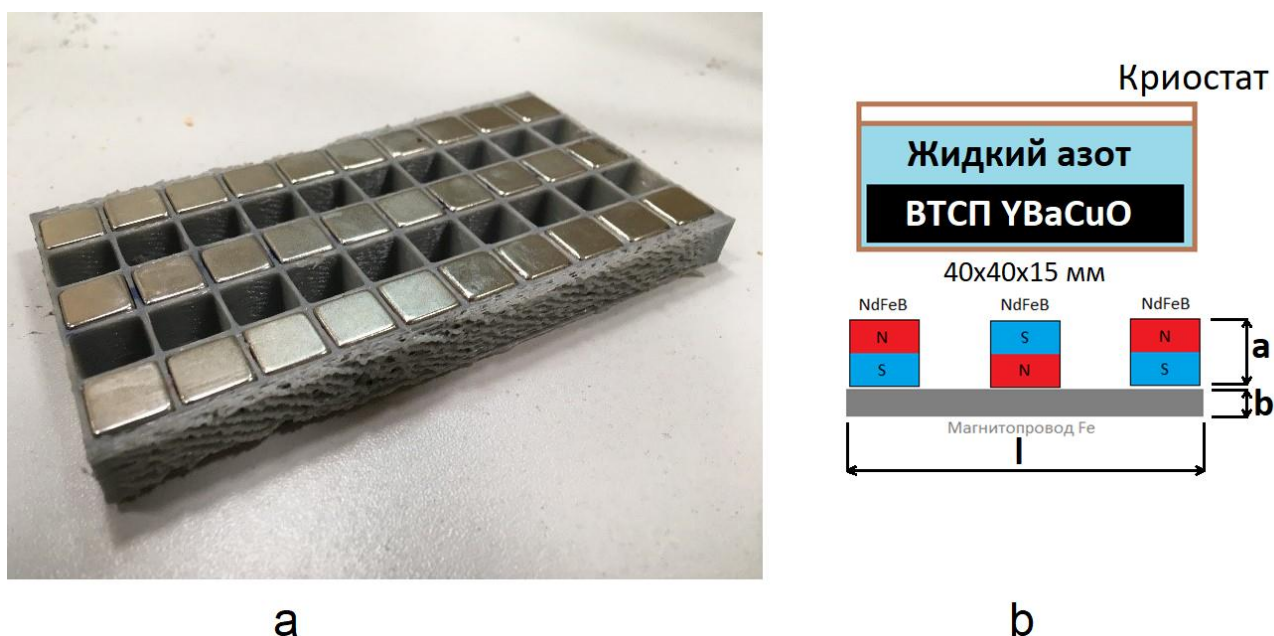


Рис. 3. Конструкция магнитолевитационной трассы. (а) – общий вид. (б) – схематический разрез.

Расстояние между линейками магнитов составляет 1 сантиметр. Зазор между магнитами в пластмассовом корпусе составлял 1 миллиметр. Для изучения возможностей масштабирования трассы были построены и изучались, как более длинные трассы ($L = 6$ м), так и более короткие ($L = 2$ м), но более широкие $l = 100$ мм, $b = 10$ мм и с большим размером кубических магнитов $a = 20$ мм.

Левитирующий криостат выполнен из тонкостенного высокопрочного пенопласта, в основании которого закреплены четыре блока ВТСП размером

40x40x15 мм (см. рис. 4). В ходе эксперимента криостат сначала при комнатной температуре устанавливается на некоторой высоте («высоте захлаживания») на немагнитной подставке над трассой (рис. 4а). Затем проводится его заполнение жидким азотом. Затем ВТСП переходит в сверхпроводящее состояние при достижении критической температуры. Магнитные силовые линии, выходящие из линейных магнитов трассы «вмораживаются» в элементы сверхпроводника второго рода (рис. 4б). При этом обеспечивается и силовое противодействие гравитации, обеспечивающее левитацию и боковое стабилизирующее усилие. В процессе эксперимента оба этих усилия измерялись динамометрами в зависимости от высоты захлаживания и размеров элементов ВТСП и магнитов трассы.

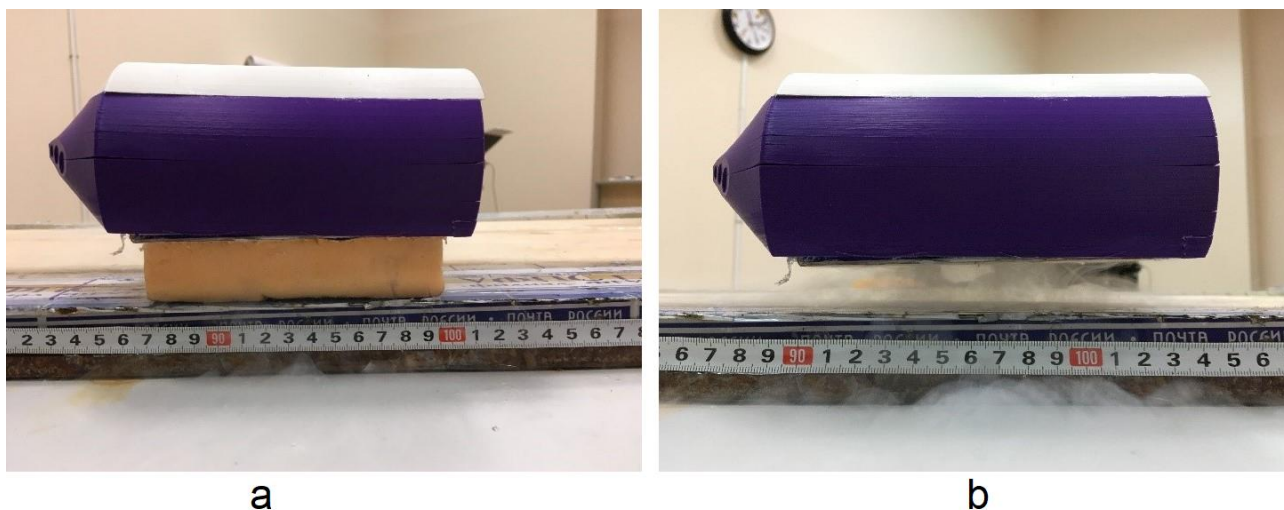


Рис. 4. Криостат с элементами ВТСП, (а) - захлаживание криостата на высоте h над трассой, (б) - левитация охлажденного криостата.

Для изучения периодического движения криостатов при магнитной левитации под действием гравитационной силы оно характеризовалось двумя методами: по анализу скоростной видеосъемки методами цифровой обработки информации и с помощью оптических датчиков скорости, размещенных вдоль трассы.

Оптические датчики включали, установленные с одной стороны от трассы фоторезисторы, и симметрично им расположенные лазерные модули, которые светят точно в апертуру фотоприемных элементов. При прохождении криостата

известной длины (135 мм) между лазером и фоторезистором, значение сопротивления датчика изменялось, оцифровывалось и анализировалось программой, написанной на языке ARDUINO MEGA. Определение скорости проводилось в трех точках на трассе.

Корректирующие скорость криостата электромагнитные катушки размещались в центре трассы симметрично с двух сторон. При необходимости увеличить скорость криостата на катушки подавался ток величиной около 2 А при напряжении до 20 В. Как только криостат достигал оси катушек, ток на катушках отключался, и криостат приобретал дополнительную скорость. Аналогично осуществлялось замедление левитирующего криостата, при достижении им оси катушек путем активации катушек током соответствующего направления.

2. Результаты и обсуждения.

В ходе серии экспериментов измерялась координата и скорость криостата и разрабатывался алгоритм управления его скоростью. На рис. 5 представлена типичная зависимость координаты криостата от времени при затухающем периодическом движении в гравитационном поле. Исследованная на экспериментальном макете система левитации имеет заметное затухание колебаний (порядка 1 % за период). Природа затухания колебаний связана со всеми видами потерь при движении левитирующего криостата. Очевидно, среди них представлены аэродинамические силы и электромагнитные силы, возникающие в системе ВТСП-ПМ. В литературе имеются попытки измерить силы трения при магнитной левитации ВТСП и разделить вклады аэродинамических и других сил трения (см., например, [6]). Однако, проблема на сегодняшний день не решена. Поэтому были испытаны управляющие электромагнитные элементы для компенсации потерь и управления движением криостата.

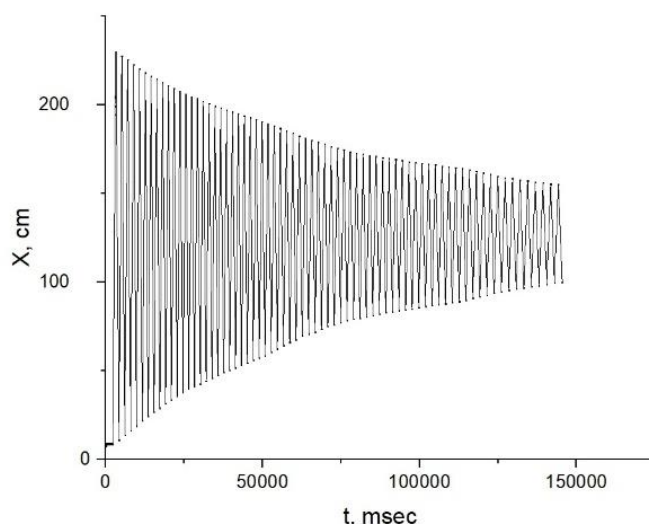


Рис. 5. Зависимость координаты криостата от времени при затухающих колебаниях.

В ходе эксперимента по управлению движением изменялась амплитуда импульса тока, который подавался на управляющую электромагнитную катушку синхронно с подлетом к ней криостата. Временная диаграмма эксперимента представлена на рис. 6. Каждый раз в момент пересечения оси катушки постоянным магнитом, укрепленным на катушке, ток выключался. На графике на рис. 6 можно выделить три участка: 0-5 сек. эксперимента, 5-25 сек. и 25-55 сек. На первом участке скорость нарастает при слишком высоком токе, на втором – стабильна при точно подобранном значении амплитуды импульса тока, на третьем – снижается при отключении системы стабилизации.

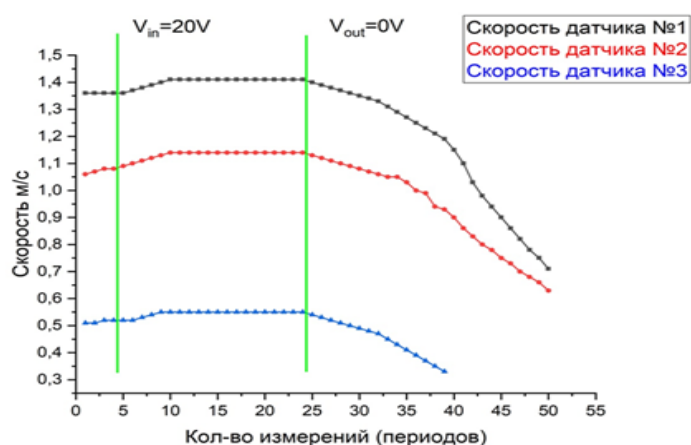


Рис. 6. Управление скоростью движения криостата при помощи электромагнитной системы. График зависимости скорости криостата от количества пройденных периодов.

В эксперименте изучались также силовые характеристики трассы с левитирующим криостатом. На рис. 7а, б представлены зависимости зазора криостата над трассой от приложенной вертикальной силы для различных значений высоты захолаживания криостата h и максимальной силы боковой стабилизации от рабочего зазора. В таблице представлены данные о зависимости максимальной боковой силы и рабочего зазора от высоты захолаживания. Из этих данных следует что криостат способен нести максимальную нагрузку при высоте захолаживания 100 мм. Максимальная нагрузка на один криостат составила 60 Н. Но результаты измерения силы боковой стабилизации в зависимости от той же высоты захолаживания показывают, что, наоборот, сила стабилизации минимальна при большой высоте захолаживания.

Эксперименты по масштабированию показали, что при увеличении размера отдельного магнита с $1 \times 1 \times 1 \text{ см}^3$ до $2 \times 2 \times 5 \text{ см}^3$ при соответственном масштабировании всей трассы по длине и ширине, а также увеличении размера криостата и увеличении количества и размеров элементов ВТСП до 6 штук при размерах $40 \times 40 \times 15 \text{ мм}^3$ обеспечивают рост и максимальной вертикальной силы и силы боковой устойчивости, а также скорости управляемого движения. Максимальная измеренная сила вертикальной нагрузки составила 600 Н на платформе из 4-х криостатов при двух-рельсовой трассе.

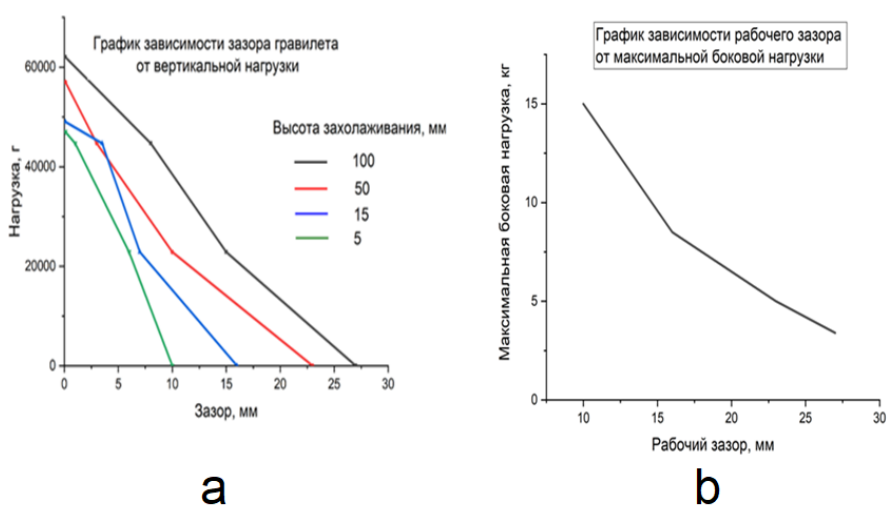


Рис. 7. Зависимости зазора криостата над трассой от приложенной вертикальной силы (а) и максимальной боковой силы от рабочего зазора (б).

Таблица 2. Зависимость рабочего зазора и максимальной силы боковой нагрузки от высоты захолаживания ВТСП в криостате.

Высота захолаживания, мм.	Рабочий зазор, мм.	Максимальная боковая нагрузка, Н.
100	27	3,4
60	23	5
20	16	8,5
10	10	15

Заслуживает внимания также проблема расхода энергии на охлаждение элементов ВТСП. Измерения расхода жидкого азота показали, что время полета криостатов составляет до 300 сек. Это по порядку величины соответствует тепловым потерям 10 Вт. Таким образом, основной проблемой при дальнейшем усовершенствовании магнитолевитационных транспортных систем является поиск решения проблемы экономичного и технологичного охлаждения элементов ВТСП до температуры сверхпроводящего перехода без расхода жидких газов. В этом смысле заслуживает внимание предложение [9] по созданию твердотельных холодильников на основе магнитокалорического эффекта в редкоземельных магнитных сплавах, например, Dy-Ni, Tb-Fe и др. [10].

Таким образом, в настоящей работе получены следующие результаты:

1) Экспериментальные исследования гравитационного разгона и торможения макета магнитолевитационной трассы на основе ВТСП Y-Ba-Cu-O и ПМ Nd-Fe-B показали, что движение криостата по трассе отличается малыми потерями энергии и высокой боковой устойчивостью. Сила вертикальной нагрузки монотонно возрастает с увеличением высоты захолаживания, а сила боковой устойчивости монотонно снижается. Требуется подбор оптимальных условий захолаживания криостата.

2) Изучение затухания позволило оценить силы сопротивления движению. Для их компенсации введена электромагнитная автоматическая адаптивная система, которая при наличии единственного электромагнита позволяет поддерживать среднюю скорость криостата постоянной.

3) Масштабное увеличение размеров элементов трассы и криостата с ВТСП приводит к увеличению грузоподъемности, латеральной стабильности и скорости.

Заключение.

Полученные результаты открывают возможность перехода к следующему уровню масштабируемости проекта: длина трассы более 10 метров, а также грузоподъемность 2000 Н при скорости до 20 км/ч. Важное значение приобретает поиск методов точного определения сил сопротивления и разделение вкладов сил аэродинамического трения и специфических потерь в сверхпроводниках второго рода. Особое значение имеет проведение экспериментов по разделению вкладов от аэродинамических сил и других сил в вакууме. Большой интерес к проблеме высокоскоростного движения магнитолевитационного транспорта в вакууме (см, например, [1,4,7,8]) указывает на то, что отлаженный на локальных и внутригородских линиях экономичный и экологичный магнитолевитационный транспорт с гравитационным принципом разгона и торможения может открыть также дорогу к сверхдальним и сверхскоростным вакуумным магистралям. Особое значение для развития этого направления исследований и разработок имеет изучение новых магнитокалорических материалов и альтернативных принципов твердотельного магнитного охлаждения.

Финансирование.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51005.

Литература

1. Терентьев Ю.А., Филимонов В.В., Шавров В.Г., Коледов В.В., Фонгратовски С.В., Суслов Д.А., 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.
<https://doi.org/10.17816/transsyst20195425-62>
2. Bernstein P., Noudem J. Superconducting magnetic levitation: principle, materials, physics and models. *Superconductor Science and Technology*. 2020. V.33. №3. P.033001. <http://doi.org/10.1088/1361-6668/ab63bd>
3. U.S. Patent №6418857. Okano Makoto, Noriharu Tamada. *Superconductive magnetic levitation transportation system*. Applied 29.09.2000. Published 16.08.2002. 11 p.
4. Salter Robert M. Transplanetary subway systems. *Futures*. 1978. V.10. №5. P.405-416. [https://doi.org/10.1016/0016-3287\(78\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0016-3287(78)90006-X)
5. Mattos L.S., Rodriguez E., Costa F., Sotelo G.G., De Andrade R., Stephan R.M. MagLev-Cobra operational tests. *IEEE Transactions on applied superconductivity*. 2016. V.26. №3. P.1-4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2524473>
6. Fernandes J., et al. Superconductor joule losses in the zero-field-cooled maglev vehicle. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2016. V.26. №3. P.1-7. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2528991>
7. Gieras J. F. Ultra-high-speed ground transportation systems: Current Status and a vision for the future. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2020. №9. P.1-7. <http://doi.org/10.15199/48.2020.09.01>
8. Богачев В.А., Терентьев Ю.А., Коледов В.В., Богачев Т.В. Новые Джунгарские Ворота для вакуумного магнитолевитационного транспортного коридора: историческая необходимость. *Транспортные системы и технологии*. 2019. Т.5. №3. С.36-44. <https://doi.org/10.17816/transsyst20195336-44>

9. Суслов Д.А., Шавров В.Г., Коледов В.В., Маширов А.В., Терентьев Ю.А., и др. Сопоставление термодинамической эффективности криогенных газовых и твердотельных магнитокалорических циклов. *Челябинский физико-математический журнал*. 2020. Т.5. №4-2. С.612-617
<https://doi.org/10.47475/2500-0101-2020-15420>
10. Колесов К.А., Маширов А.В., Коледов В.В., и др. Определение параметров теплопередачи в механическом тепловом ключе для холодильной машины с магнитокалорическим. *Челябинский физико-математический журнал*. 2021 Т.6. №1. Р.111-118. <https://doi.org/10.47475/2500-0101-2021-16109>

Для цитирования:

Карпухин Д.А., Петров А.О., Коледов В.В., Суслов Д.А., Шавров В.Г., и др. Твердотельные магнитные материалы для магнито-левитационного транспорта. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2021. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.20>