

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехнология и электрофизика

УДК [UDC] 538.955

DOI 10.17816/transsyst20228446-57

© И.В. Мартиросян, М.А. Осипов, А.С. Стариковский,
С.В. Покровский, И.А. Руднев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Москва, Россия)

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ВТСП СБОРОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИЖУЩЕЙСЯ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Цель: анализ влияния условий охлаждения высокотемпературных сверхпроводящих элементов на силовые характеристики магнитолевитационной системы в условиях быстроменяющихся магнитных полей

Методы: численный мультифизический анализ магнитолевитационной системы выполнен методом конечных элементов в среде инженерного моделирования Comsol Multiphysics.

Результаты: при быстрых, более чем 5 Тл/с, скоростях изменения магнитного поля, обусловленных движением сверхпроводника в магнитном поле с неоднородным локальным распределением, преимущественным способом охлаждения является использование криокулерной техники. При скоростях изменения магнитного поля менее 5 Тл/с допустимо использование в качестве охладителя жидкого азота.

Заключение: разработанная численная модель позволяет прогнозировать динамические характеристики левитационных систем различного масштаба и может быть применена для бесконтактного транспорта, а также во вращающихся машинах, в том числе кинетических накопителях энергии.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, магнитная левитация, транспортные системы, метод конечных элементов.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrotechnology and Electrophysics

© I.V. Martirosian, M.A. Osipov, A.S. Starikovskii, S.V. Pokrovskii,
I.A. Rudnev

National research nuclear university MEPhI
(Moscow, Russia)

INFLUENCE OF COOLING CONDITIONS OF HTS ASSEMBLY ON THE CHARACTERISTICS OF A MOVING MAGLEV SYSTEM

Background: analysis of the influence of cooling conditions of high-temperature superconducting elements on the power characteristics of a maglev system under conditions of rapidly changing magnetic fields.

Aim: analysis of the influence of cooling conditions of high-temperature superconducting elements on the force characteristics of a maglev transport platform under conditions of rapidly changing magnetic fields caused by the inhomogeneity of the magnetic track.

Methods: numerical analysis of the maglev system was performed by the finite element method in the Comsol Multiphysics engineering simulation software.

Results: at fast, more than 5 T/s, magnetic field change rates, due to the motion of the superconductor in a magnetic field with a non-uniform local distribution, the preferred method of cooling is the use of cryocooler technology. At rates of change of the magnetic field less than 5 T/s, it is permissible to use liquid nitrogen as a cooler.

Conclusion: The developed numerical model makes it possible to predict the dynamic characteristics of levitation systems of various scales and can be applied to contactless transport, as well as in rotating machines, including kinetic energy storage devices.

Key words: high-temperature superconductor, maglev, transport systems, finite element method.

ВВЕДЕНИЕ

Бесконтактные системы на основе левитационных технологий имеют значительные перспективы практического применения в реальных транспортных системах, а также вращающихся машинах, кинетических накопителях энергии. Один из способов реализации магнитного подвеса представляет собой применение пары сверхпроводник – постоянный магнит, в которой взаимное отталкивание элементов пары и, как следствие, бесконтактное движение, реализуются за счет эффекта Мейсснера-Оксенфельда. Особенно с этой точки зрения привлекательны так называемые высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) с критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние превышающей температуру кипения жидкого азота, что делает возможным использование этого дешевого хладагента для охлаждения ВТСП элементов. Вопросами создания магнитолевитационного транспорта активно занимаются в ряде научных лабораторий и университетов как мира, так и России [1–6]. В ранних исследованиях в качестве ВТСП элементов применялись объемные сверхпроводники, однако в последнее время для создания магнитолевитационных систем все больше внимания уделяется альтернативным подходам, основанным на использовании различных наборов (или стопок) ленточных ВТСП композитов [7, 8]. Ленточные ВТСП композиты имеют слоистую структуру, содержащую прочную металлическую подложку, слой сверхпроводника, а также слои меди и серебра с хорошей теплопроводностью [9]. ВТСП-ленты могут быть сложены в стопки, имеющие высокую термическую и механическую

стабильность, а левитационные характеристики стопок лент сопоставимы и с объемными ВТСП, а в ряде случаев превосходят их [10–13]. Физические и механические свойства, а также высокая коммерческая доступность, в настоящее время делают стопки ВТСП лент привлекательной альтернативой объемным сверхпроводникам в левитационных системах.

При рассмотрении возможности создания магнитолевитационного транспорта необходимо учитывать тот факт, что функционирование ВТСП элементов будет происходить в динамических условиях разгона, движения и торможения [14]. В частности, одной из проблем при движении ВТСП элементов является перемагничивание сверхпроводника, которое вызвано неизбежной локальной неоднородностью магнитного трека, связанного, например, с неоднородностью намагниченности постоянных магнитов или несовершенством их укладки в опорном магнитном треке. В таких случаях скорость изменения магнитного поля может превышать 100 Тл/с, когда расстояние между магнитами с сверхпроводящими элементами изменяется даже на относительно небольшие величины в сильных магнитных полях за короткое время. Еще более высокие скорости изменения магнитного поля могут быть достигнуты в движущихся левитационных подвесах из-за неоднородности магнитной дорожки. Действительно, магнитная неоднородность всего в 0,1 Тл на высоте 1 см над магнитным рельсом приводит к скорости изменения магнитного поля более 1000 Тл/с при разгоне тележки всего лишь в 100 км/ч. Перемагничивание сверхпроводника приводит к выделению энергии, что, в свою очередь, при недостаточном теплоотводе может вызвать рост температуры сверхпроводника, понижение его критического тока и потерю магнитолевитационных характеристик. Таким образом, в динамических режимах функционирования, актуальным становится вопрос как о способах охлаждения сверхпроводящего элемента, так и о способах отвода выделяющегося в нем тепла. Охлаждение сверхпроводника может осуществляться двумя способами: с помощью криокулера и жидким хладагентом (как правило, жидким азотом). В работе [15] были рассмотрены различные аспекты криокулерного охлаждения. В настоящей статье мы проводим сравнение эффективности криокулерного и азотного охлаждения стопок ВТСП лент как элементов транспортной магнитолевитационной системы в различных динамических условиях изменения магнитного поля.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ВТСП ЭЛЕМЕНТА

В рамках представленной работы рассмотрены две системы охлаждения намагничиваемой в поле постоянного магнита стопки ВТСП

лент: криокулерное охлаждение и охлаждение жидким азотом. При использовании криокулера охлаждение происходит, как правило, с одной стороны стопки, примыкающей к холодной головке криокулера. В случае использования жидкого азота охлаждение осуществляется по всему периметру стопки, помещенной в жидкий азот. Базовая геометрия криоохлаждаемой системы левитации показана на Рис. 1А. В этом случае слоистая стопка ВТСП-лент (Рис. 1Б) располагается в горизонтальной плоскости xy и размещается на медной головке криокулера. Постоянный магнит, распределение магнитного поля которого показано на Рис. 1С, перемещается вдоль вертикальной оси z . При намагничивании магнит приближается к стопке ВТСП лент с расстояния 30 см до высоты 7 мм над поверхностью стопки, а затем вновь отдаляется от нее на то же расстояние. Таким образом имитируется режим охлаждения в нулевом поле (zero field cooling – ZFC). Намагничивание стопки ВТСП лент выполняется при температуре 77,4 К для обоих вариантов охлаждения (криокулер, жидкий азот). Скорость ввода магнитного поля при намагничивании варьировалась от 0,05 до 30 Тл/с посредством изменения времени подвода и отвода постоянного магнита. На практике такие условия могут быть реализованы либо при сильных скачках магнитного поля, либо при импульсном намагничивании стопки лент.

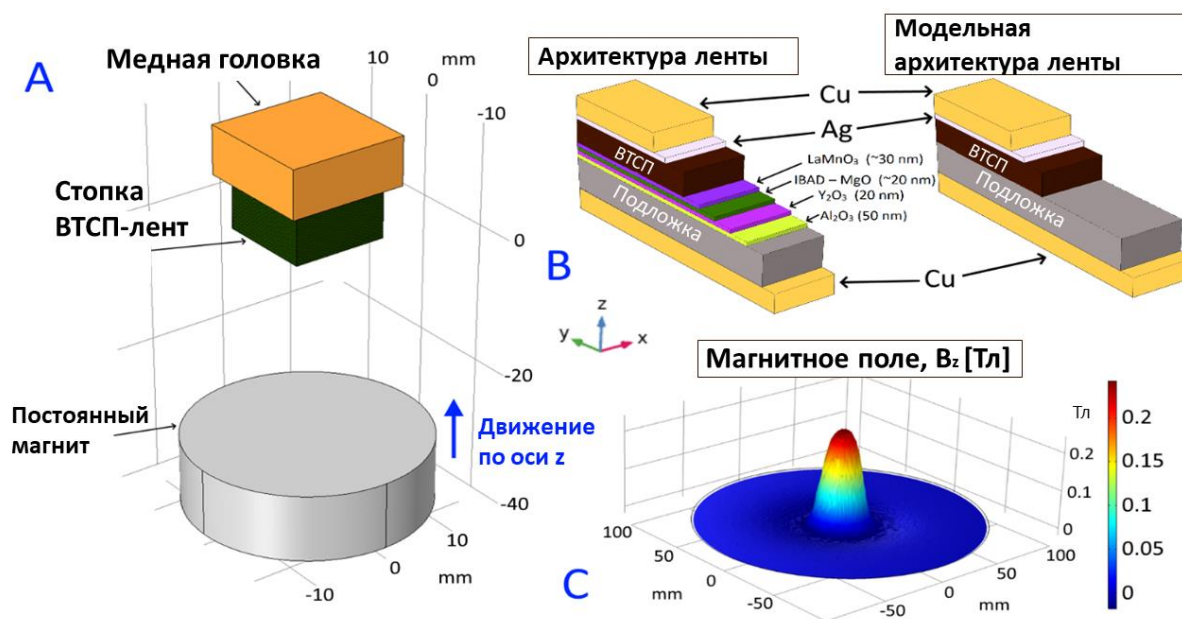


Рис. 1. Система охлаждения ВТСП эксперимента

А – конфигурация системы левитации;

В – реальная и модельная ленточные архитектуры;

С – распределение поля постоянного магнита на высоте 7 мм над его поверхностью

В качестве образцов ВТСП лент рассматривались композитные структуры, которые в рамках модели содержат ВТСП слой, слой подложки, меди и серебра (Рис. 1В). В качестве прототипов моделируемых лент выступали промышленные ВТСП ленты фирм SuperOx и Sunam, основные характеристики которых представлены в Табл. 1. Подробная спецификация характеристик ВТСП лент представлена на сайте производителя для лент SuperOx [16] и Sunam [17].

Таблица 1. Характеристики ВТСП лент

Параметр	SuperOx	Sunam
Толщина сверхпроводящего слоя REBCO (где RE-редкоземельный элемент)	1–3 мкм	1–3 мкм
Подложка	Hastelloy C276 50 мкм	Non-magnetic SUS : 80 мкм
Толщина слоя серебра	3 мкм	1,5 мкм
Толщина медного слоя	30 мкм	20 мкм
Средний критический ток для ленты шириной 12 мм, А	550	850
Показатель степени ВАХ (используется при расчетах)	~27	~27

Максимальная высота стопки, рассмотренной в данной работе составляла 70 шт. лент. Критический ток ВТСП лент в рамках модели искусственно изменялся от 150 до 650 А. В качестве источника внешнего магнитного поля принимается Ne-Fe-B магнит диаметра 30 мм, высоты 10 мм с остаточной индукцией магнитного поля на поверхности 0,38 Тл.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

А. Электродинамическая модель

FEM (finite element model) модель магнитной левитационной системы была выполнена с использованием А-Н формализма, реализованного в программной среде Comsol Multiphysics. Данный формализм был успешно применен для расчета поведения ВТСП материалов, а также для расчета магнитных систем на их основе [14]. В этой постановке задачи прямой решатель среды Comsol Multiphysics использует две статических переменных: магнитное поле $\mathbf{H}$ и магнитный векторный потенциал $\mathbf{A}$. Прямой решатель использует больше памяти, но при этом обладает большей точностью в сравнении с итерационным решателем.

Формулировка в терминах компонент магнитного поля (Н-формализм) применяется в ВТСП доменах для решения задачи о распределении плотности тока $\mathbf{J}$ в сверхпроводнике:

$$J = \nabla \times H \quad (1)$$

Управляющее уравнение для нестационарной задачи в случае Н-формализма представляет собой закон Фарадея:

$$\nabla \times E + \frac{dB}{dt} = \nabla \times E + \frac{d(\mu_0 H)}{dt} = 0 \quad (2)$$

где E – напряженность электрического поля, B – индукция магнитного поля, t – время, μ_0 – относительная магнитная проницаемость.

В остальных областях решается задача для магнитного векторного потенциала. Управляющее уравнение А-формализма выглядит следующим образом:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (3)$$

где μ – магнитная проницаемость.

Вольтамперная характеристика $E = \rho \cdot J$ задается в виде степенного закона для сопротивления ВТСП слоя.

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \cdot \left(\frac{|J|}{J_c} \right)^{n-1} \quad (4)$$

где E – напряженность электрического поля, ρ – сопротивление, E_c – критерий, равный 1 мкВ/см, J_c – плотность критического тока, n – показатель степени ВАХ. Плотность критического тока J_c автоматически вычисляется как частное критического тока и сечения ВТСП слоя ленты, размеры которого известны. Величина критического тока, так же, как и величина показателя степени n , являются одними из основных характеристик ВТСП материала и были представлены в Табл. 1. Распределение тока J вычисляется на основе закона Ампера (1) и применяется в выражении (4) для вычисления сопротивления сверхпроводника. Для других слоев ВТСП ленты используется линейная зависимость сопротивления от тока. В качестве граничных условий используется условие Дирихле.

В. Теплофизическая модель

В основе описания физики тепловых процессов заложено нестационарное уравнение теплопередачи в твердых телах:

$$dC_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q + dC_p u \nabla T \quad (5)$$

где

d – плотность;

C_p – теплоемкость;

T – температура;

k – теплопроводность;

Q – все источники тепла, включая термоэлектрические;

u – поле скорости температур.

Плотности, теплоемкости и теплопроводности всех слоев ленты заложены в виде интерполяции экспериментальных данных [15]. Локальное тепловыделение в системе $Q = E \cdot J$ связывает электродинамическую и теплофизическую задачи. Зависимость критического тока лент от температуры задается выражением:

$$J_c = \alpha \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right)^{1,5} \quad (6)$$

где

T_c – критическая температура, равная 92 К;

α – фитирующий параметр.

В рамках модели криокулерная система охлаждения представляет собой массивную медную головку, мощность теплоотвода которой соответствует мощности реальной криокулерной системы охлаждения.

Тепловой анализ в случае охлаждения жидким азотом сводится к определению эффективного коэффициента теплоотдачи в хладагент, при этом численная модель учитывает гистерезисный характер кривой кипения жидкого азота, возможность многократной смены режимов кипения, наличие тепловой задержки начала пузырькового кипения [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Перейдем к рассмотрению влияния системы охлаждения на левитационные свойства стопок ВТСП-лент. На Рис. 2 приведены зависимости максимальной силы левитации от числа лент в стопке для криокулерного охлаждения до температуры 77,4 К и азотного охлаждения при скорости намагничивания 0,05 Тл/с. Видно, что при высоте стопки менее 30 шт. лент сила левитации при охлаждении обоими способами практически совпадает. При дальнейшем увеличении высоты стопки, слои, наиболее отдаленные от холодной головки криокулера начинают нагреваться сильнее, что отрицательно сказывается на захвате магнитного потока и силе левитации. С этой точки зрения азотное охлаждение, выполняемое по всему периметру стопки, при низкой скорости изменения магнитного поля и высоких критических токах оказывается выгоднее.

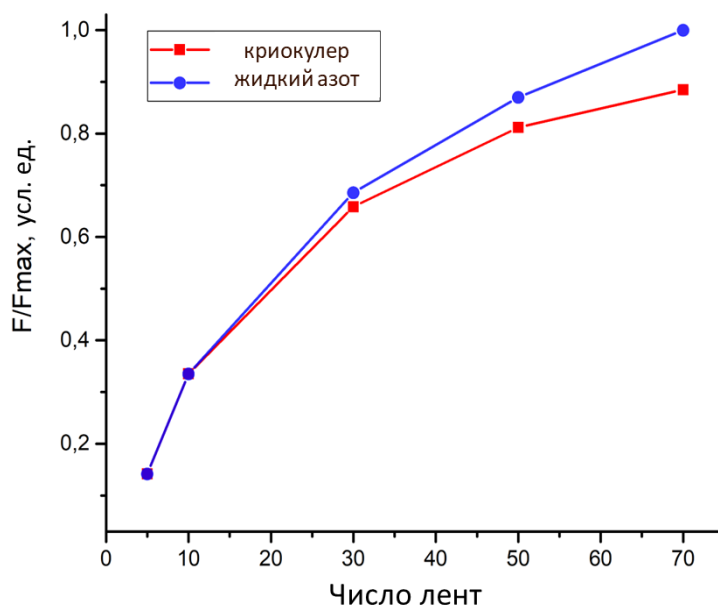


Рис. 2. Зависимости силы левитации от числа лент в стопке:
скорость намагничивания – 0,05 Тл/с; критический ток лент – 300 А

Для того, чтобы объяснить низкую эффективность криокулерного охлаждения высоких (>30 лент) стопок было рассчитано распределение захваченного магнитного потока стопкой 50 ВТСП лент с различным критическим током при охлаждении криокулером до температуры 77,4 К (скорость ввода магнитного поля 0,05 Тл/с). Ввиду особенностей экранировки дальних слоев стопки ближними уже при температуре 77,4 К, стопки с более высоким критическим током не намагничены полностью. Это приводит к снижению эффективности захвата магнитного потока и уменьшению силы левитации при увеличении числа лент в стопке.

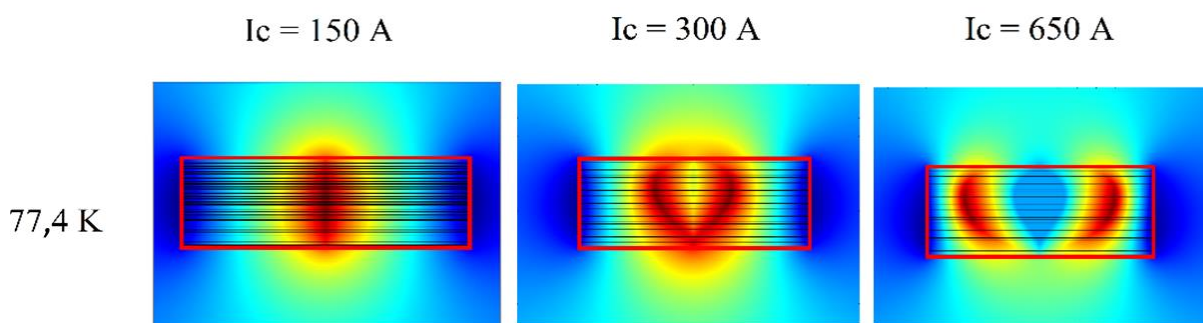


Рис. 3. Распределение захваченного магнитного потока стопками 50 ВТСП лент с различным инженерным критическим током при охлаждении криокулером до температуры 77,4 К: скорость намагничивания 0,05 Т/с; холодная головка криокулера расположена сверху в соответствии с Рис. 1А

Однако для более высоких скоростей намагничивания, избыточное тепловыделение приводит к вскипанию жидкого азота и снижению

эффективности охлаждения из-за так называемого кризиса кипения (теплопроводность пара значительно уступает теплопроводности жидкости). Поэтому при намагничивании со скоростью более 5 Тл/с криокулерное охлаждение приводит к большей левитационной силе в сравнении с азотным охлаждением (Рис. 4). Причем чем меньше ВТСП лент в стопке, тем больше выигрыш в силе левитации при криокулерном охлаждении. Результаты численного анализа показали, что охлаждение жидким азотом является эффективным лишь для таких скоростей ввода поля, при которых изменение температуры в системе не превышает 3 К. Как только температура в системе начинает изменяться сильнее, процессы интенсивного кипения хладагента и многократной смены режимов его кипения приводят к снижению эффективности теплопередачи в окружающий тепловой резервуар. В случае охлаждения системы криокулером до температуры 77,4 К, сила левитации такая же, как для азотного охлаждения при скорости ввода поля менее 5 Тл/с и высоте стопки менее 30 шт. лент. Как только скорость ввода магнитного поля становится выше, сила левитации при азотном охлаждении становится ниже, поскольку прирост температуры в системе превышает 3 К и теплоотвода при помощи жидкого азота становится недостаточно для эффективного охлаждения.

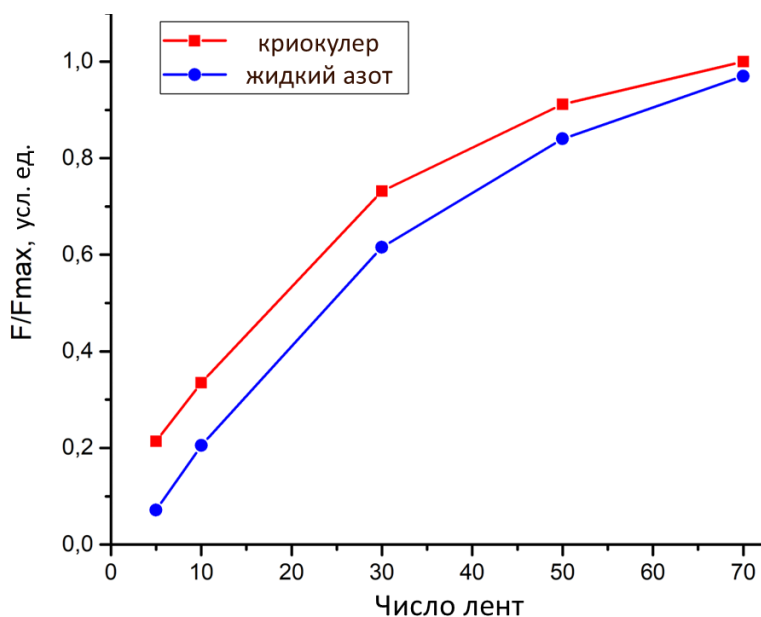


Рис. 4. Зависимости силы левитации от числа лент в стопке при криокулерном и азотном охлаждении: скорость намагничивания – 5 Т/с; критический ток лент – 300 А

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана комплексная мультифизическая модель магнитного подвеса на основе 2G ВТСП композитов, которая позволяет проводить

совместный электродинамический и тепловой расчет параметров магнитной системы при движении стопки ВТСП лент в неоднородном магнитном поле. С использованием разработанной модели проведены исследования тепловых характеристик магнитолевитационной системы в динамических режимах, с использованием двух методов охлаждения: криокулерного охлаждения и охлаждения жидким азотом. Исследования проводились путем численного моделирования левитационной системы на основе стопок ВТСП-лент методом конечных элементов с использованием пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics. На основании полученных результатов численного моделирования можно заключить, что, охлаждение жидким азотом является эффективным при относительно малых скоростях изменения магнитного поля, которое не приводит к изменению температуры в системе более, чем на 3 К. При превышении этого значения эффективность теплоотдачи в окружающий тепловой резервуар снижается ввиду ухудшения характеристик хладагента при смене режимов кипения.

В заключение отметим, что охлаждение жидким азотом не может понизить температуру сверхпроводящего элемента ниже 65 К (тройная точка азота), в то время как охлаждение с помощью криокулеров позволяет получить любые температуры, вплоть до гелиевых. Таким образом, если при конструировании магнито-левитационных систем предполагаются более низкие рабочие температуры, использование криокулерной техники становится безальтернативным.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

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. Chu BK, Ma KB, McMichael CK, et al. Applications of high temperature superconductors on levitation bearings and other levitation devices. *Applied Superconductivity*, 1993, 1:1259–1264. doi: 10.1016/0964-1807(93)90434-4
2. Moon FC. *Superconducting Levitation: Applications to Bearing & Magnetic Transportation* 1994. August 01, 1994. 310 p. [cited 2022 November 30]. Available from: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1994slab.book.....M/>
3. Ma K, Postrekhin YV, Chu W-K. Superconductor and magnet levitation devices. *REV SCI INSTRUM*. 2003;74:4989-5017. doi: 10.1063/1.1622973
4. Hull JR. Superconducting bearings. *SUPERCOND SCI TECH* (Online). 2000;13(2):R1-

- R15. doi: 10.1088/0953-2048/13/2/201
5. Wang J, Wang S, Zeng Y, et al. The first man-loading high temperature superconducting Maglev test vehicle in the world. *Physica C*. 2002;378-381:809-14. doi: 10.1016/S0921-4534(02)01548-4
 6. Deng Z, Zhang W, Zheng J, et al. A High-Temperature Superconducting Maglev Ring Test Line Developed in Chengdu, China. *IEEE T APPL SUPERCON*. 2016;26(6):1-8. doi:10.1109/TASC.2016.2555921
 7. Jha AK, Matsumoto K. Superconductive REBCO Thin Films and Their Nanocomposites: The Role of Rare-Earth Oxides in Promoting Sustainable Energy, (in English). *Frontiers in Physics, Review*, 2019;7. doi: 10.3389/fphy.2019.00082
 8. Barth C, Mondonico G, Senatore C. Electro-mechanical properties of REBCO coated conductors from various industrial manufacturers at 77 K, self-field and 4.2 K, 19 T. *Superconductor Science and Technology*, 2015;28(4):045011. doi: 10.1088/0953-2048/28/4/045011
 9. MacManus-Driscoll JL, Wimbush SC. Processing and application of high-temperature superconducting coated conductors. *Nature Reviews Materials*, 2021;6(7):587-604. doi: 10.1038/s41578-021-00290-3
 10. Lee S, Petrykin V, Molodyk A, et al. Development and production of second generation high T_c superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables. *SUPERCOND SCI TECH*. 2014;27:044022. doi: 10.1088/0953-2048/27/4/044022
 11. Tomków Ł, Mineev N, Smara A, et al. Theoretical analysis of heat transport in tilted stacks of HTS tapes at temperatures above 20 K. *Cryogenics*, 2020;105:103017. doi: 10.1016/j.cryogenics.2019.103017
 12. Selvamanickam V. High temperature superconductor (HTS) wires and tapes. 2012. pp. 34-68. doi: 10.1533/9780857095299.1.34
 13. Patel A, Baskys A, Mitchell-Williams T, et al. A trapped field of 17.7 T in a stack of high temperature superconducting tape. *Superconductor Science and Technology*, 2018;31(9):09LT01. doi: 10.1088/1361-6668/aad34c
 14. Мартиросян И.В., Покровский С.В., Осипов М.А. и др. Моделирование динамических характеристик магнитолевитационной транспортной платформы в процессе движения, разгона и торможения // *Инновационные транспортные системы и технологии*. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 63–77. [Martirosian IV, Pokrovskii SV, Osipov MA, et al. Simulation of the maglev suspension dynamic characteristics during movement, acceleration and deceleration. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(3):63-77. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20228363-77
 15. Anischenko IV, Osipov MA, Pokrovskii SV, et al. Magnetic Levitation Characteristics of the System of Permanent Magnet Stacks of HTS Tapes of Various Architectures. *Physics of Atomic Nuclei*, 2021;4(12):1982-1990. doi: 10.1134/S1063778821100045 <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063778821100045#citeas>
 16. SuperOx [Internet]. [cited 2022 November 30]. Available from: <https://www.superox.ru/>
 17. SuNUM [Internet]. [cited 2022 November 30]. Available from: <http://www.i-sunam.com/wp/sunam1-2/?ckattempt=1>
 18. Zubko VV, Fetisov SS, Zanegin SY, et al. Analysis of behaviour of HTS tapes cooled by liquid nitrogen under currents more than the critical current. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019;502:012178. doi: 10.1088/1757-899x/502/1/012178

Сведения об авторах:

Мартirosян Ирина Валерьевна, научный сотрудник;
eLibrary SPIN:3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;
E-mail: mephizic@gmail.com

Покровский Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук,
заведующий научно-исследовательской лаборатории;
eLibrary SPIN:6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;
E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Осипов Максим Андреевич, научный сотрудник;
eLibrary SPIN:4776-7939; ORCID: 0000-0002-8981-5606;
E-mail: max.vfk@gmail.com

Стариковский Александр Сергеевич, аспирант, младший научный сотрудник;
eLibrary SPIN: 9493-3256; ORCID:0000-0002-7605-7578;
E-mail: sanniyok1995@gmail.com

Руднев Игорь Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник;
eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;
E-mail: iarudnev@mephi.ru

Information about the authors:

Irina V. Martirosian, Research Fellow;
eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;
E-mail: mephizic@gmail.com

Sergey V. Pokrovskii, PhD in Physics and Mathematics, Head of the Laboratory;
eLibrary SPIN: 6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;
E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Maxim A. Osipov, Research Fellow;
eLibrary SPIN: 4776-7939; ORCID: 0000-0002-8981-5606;
E-mail: max.vfk@gmail.com

Alexander S. Starikovskii, Graduate, junior researcher;
eLibrary SPIN: 9493-3256; ORCID:0000-0002-7605-7578;
E-mail: sanniyok1995@gmail.com

Igor A. Rudnev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Lead Research Fellow;
eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;
E-mail: iarudnev@mephi.ru

Цитировать:

Мартirosян И.В., Покровский С.В., Осипов М.А. и др. Влияние условий охлаждения ВТСП сборок на характеристики движущейся магнитолевитационной системы // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 46–57. doi: 10.17816/transsyst20228446-57

To cite this article:

Martirosian IV, Pokrovskii SV, Osipov MA, et al. Influence of cooling conditions of HTS assembly on the characteristics of a moving maglev system. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):46-57. doi: 10.17816/transsyst20228446-57