



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.48>

УДК: 538.955.35

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ ОХЛАЖДЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА ЛЕВИТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТОПКИ ВТСП ЛЕНТ

И.В. Мартиросян, Д.А. Александров, А.С. Стариcovский,
М.А. Осипов, С.В. Покровский

Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»,
Каширское шоссе, 31, Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 30 октября 2025 г.

Аннотация. Бесконтактные магнитные подвесы на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) представляют особый интерес благодаря их способности обеспечивать устойчивую левитацию без активных систем управления. Одним из ключевых факторов, влияющих на характеристики таких систем, является высота охлаждения (Field Cooling Height, FCH), определяющая распределение захваченного магнитного потока и, как следствие, величину и стабильность левитационных сил. Цель настоящей работы – экспериментально и численно исследовать влияние FCH на вертикальные и латеральные характеристики простого ВТСП подвеса. В качестве объекта исследования выступает базовая конфигурация ВТСП подвеса, состоящая из стопки композитных ВТСП лент YBCO и стопки цилиндрических NdFeB постоянных магнитов. Эксперименты проводились при охлаждении жидким азотом для различных значений FCH в диапазоне 6–60 мм. Численное моделирование выполнено методом конечных элементов в А-Т формализме при аналогичных геометрических параметрах. Получены вертикальные и латеральные нагрузочные характеристики ВТСП подвеса. Установлено, что максимальная вертикальная левитационная сила нелинейно возрастает с увеличением FCH, тогда как максимальная

возвращающая сила при латеральных смещениях, напротив, уменьшается. Отмечена выраженная обратная корреляция между этими силами. Выявленные зависимости отражают баланс между несущей способностью и устойчивостью подвеса, обусловленный особенностями взаимодействия сверхпроводника с неоднородным магнитным полем. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации параметров ВТСП подшипников, опор и транспортных платформ, а также для разработки новых методов управления их левитационными характеристиками.

Ключевые слова: сила левитации, стопки ВТСП лент, ВТСП подшипник, ВТСП подвес, ВТСП композиты, высота охлаждения в поле, FCH.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00394, <https://rscf.ru/project/23-19-00394/>

Автор для переписки: Мартиросян Ирина Валерьевна, mephizic@gmail.com

Введение

Бесконтактные магнитные подвесы или опоры можно разделить на две большие группы: системы на основе постоянных магнитов (ПМ) и традиционных материалов и сверхпроводниковые системы [1]. Основное отличие традиционных бесконтактных магнитных систем состоит прежде всего в том, что в таких системах требуется организация обратной связи для поддержания левитационного зазора в заданных пределах, что в свою очередь влечет необходимость организации не самой простой системы управления [2].

В отличие от традиционных магнитных подвесов и опор, сверхпроводниковые системы являются устойчивыми в силу свойств сверхпроводящего материала захватывать внешнее магнитное поле и «запоминать» его конфигурацию [3]. Левитационный подвес или опора на основе сверхпроводников может быть создана с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) на основе соединения $(RE)Ba_2Cu_3O_{7-x}$ (где RE – редкоземельный элемент, далее REBCO), наиболее часто представленного в виде объемной ВТСП керамики [4-6] или композитных ВТСП лент [7,8]. К настоящему времени ленточные

проводники продемонстрировали эффективность в качестве альтернативы объемным материалам [9,10], что обусловило релевантность применения опор, подвесов и подшипников на основе ВТСП лент в различных областях науки и техники, таких как кинетические накопители энергии [11,12], транспортные системы [13,14] и высокоточные прецизионные механизмы [15,17].

В подавляющем большинстве конструкций левитационных систем предполагается намагничивание ВТСП элементов в режиме охлаждения в присутствии внешнего магнитного поля (FC). При этом особое внимание уделяется высоте охлаждения (*field cooling height, FCH*), то есть расстоянию, на котором находится ВТСП элемент относительно источника магнитного поля в момент его охлаждения ниже критической температуры. Изменение FCH приводит к изменению начальной конфигурации магнитного поля, в связи с чем оказывает непосредственное влияние на характеристики устройства, такие, например, как боковая устойчивость и величина левитационной силы. В литературе имеется значительное количество работ, посвященных влиянию различных факторов на силу магнито-левитационного взаимодействия между стопками ВТСП лент и постоянными магнитами. В последние годы внимание было сосредоточено на экспериментальных исследованиях и моделировании левитационных характеристик ВТСП стопок в магнитных полях различных конфигураций [18-20], влиянии циклических вертикальных и латеральных перемещений на магнитные свойства ленточных ВТСП композитов [8,21,22], а также установлении температурных зависимостей для левитационных сил [23,24]. Исследования влияния высоты охлаждения на силу левитации выполнены для MgB_2 [25], а также для объемного YBCO для нескольких вариантов магнитных сборок [26], а зависимости латеральных левитационных сил для объемного ВТСП от FCH были численно проанализированы в работе [27]. Однако результаты комплексного исследования влияния FCH на вертикальную и латеральную силы левитации для стопок ВТСП лент YBCO в литературных источниках не представлены.

Настоящая работа посвящена экспериментальному и численному исследованию влияния высоты охлаждения на левитационные характеристики базовой конфигурации ВТСП подвеса, состоящего из стопки композитных ВТСП лент и набора постоянных цилиндрических магнитов. Использование базовой конфигурации обусловлено тем, что такая конфигурация является максимально простой и позволяет сосредоточиться на основных аспектах взаимодействия сверхпроводника с магнитным полем без дополнительных усложнений, связанных с геометрией магнитной системы или спецификой распределения поля более сложных магнитных сборок. В рамках представленного исследования основное внимание уделяется анализу зависимости силы левитации от FCH при изменении положения ВТСП элемента относительно магнита вдоль вертикального и горизонтального (латерального) направлений.

1. Методика проведения исследований

Принципиальная геометрия ВТСП опоры или подвеса в базовой конфигурации приведена на Рис. 1. Левитационная система состоит из стопки ВТСП лент, помещенной во внешнее градиентное магнитное поле. С целью увеличения магнитуды поля в качестве источника внешнего магнитного поля используется стопка постоянных цилиндрических магнитов, намагниченных в одном направлении.

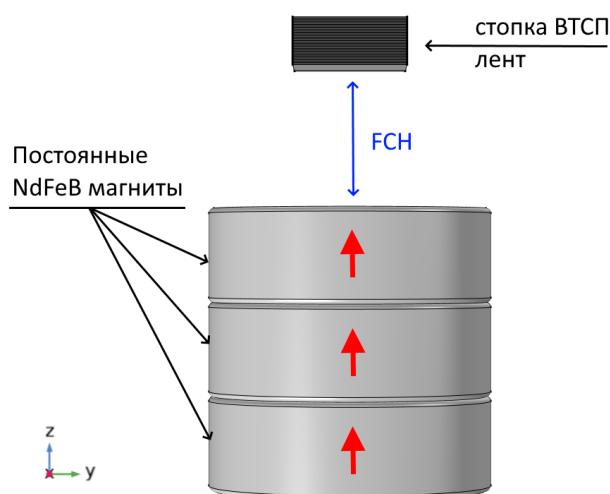


Рис. 1. Принципиальная схема простого ВТСП подвеса. Красными стрелками указано направление намагниченности постоянных магнитов.

Экспериментальные исследования силы взаимодействия между стопкой ВТСП лент и ПМ-сборкой проводились на образцах ленты шириной 12 мм с медным покрытием промышленного производства СуперОкс [28,29]. Используемые ВТСП ленты имеют слоистую архитектуру, содержащую слои подложки толщины 100 мкм, наноразмерные буферные и защитные слои (суммарной толщины ~120 нм), ВТСП слой толщины 1-3 мкм, слой серебра толщины 2-3 мкм и двустороннее медное покрытие толщины ~5 мкм. Критический ток ВТСП ленты в собственном поле при температуре кипения жидкого азота (77,4 К) составляет 550 А. Для проведения эксперимента длинномерная лента разрезается на квадратные фрагменты 12 мм × 12 мм, которые укладываются в стопку из 50 штук. Толщина стопки в 50 ВТСП лент была выбрана из соображений оптимальности такой высоты стопки для достижения максимальных левитационных сил в поле ПМ при температуре кипения жидкого азота [17,20,30].

В качестве источника внешнего магнитного поля для намагничивания образца выступает сборка 3 постоянных магнитов, расположенных в стопке с одинаковым направлением намагниченности ПМ. Каждый из трех магнитов в стопке представляет собой NdFeB магнит марки N45 и имеет диаметр 30 мм и высоту 10 мм, создавая результирующее магнитное поле на поверхности сборки величиной в ~0,58 Тл.

Экспериментальные исследования левитационных характеристик описанного ВТСП подвеса выполнялись с использованием экспериментального стенда, подробно описанного в [22]. Процесс измерения вертикальной компоненты силы взаимодействия проходил следующим образом. Стопка ВТСП лент была размещена на некотором начальном расстоянии FCH над постоянным магнитом, которое варьировалось в различных циклах измерений от 6 мм до 60 мм. Затем криостат заполняли жидким азотом для охлаждения образца в режиме FC, после чего он начинал спускаться к магниту с шагом 0,5 мм. Минимальное расстояние между образцом и постоянными магнитами в конечном положении составляло 5 мм, после чего стопка лент возвращалась в исходное положение.

Во время процедуры измерения кривых подвода/отвода образец останавливался на 0,5 секунды после каждого шага перемещения, и в это время тензодатчиком проводилось измерение силы взаимодействия.

При измерении латеральных сил стопка ВТСП лент размещалась аналогичным образом на тех же начальных расстояниях, как и при измерении вертикальной компоненты силы, но в данном случае после охлаждения на высоте FCH проводились боковые смещения стопки относительно центра массива магнитов с шагом 0,5 мм. Стопка лент перемещалась на 15 мм в горизонтальном направлении в положительном направлении оси X, затем на 30 мм в отрицательном направлении вдоль оси X. После этого криостат с образцом перемещался на 15 мм в положительном направлении оси X, так что в конечный момент времени стопка ВТСП лент оказалась в своем исходном положении. Одновременно с этим на каждом шаге перемещения образца производились измерения латеральной (вдоль направления движения) составляющих силы взаимодействия между стопкой ВТСП лент и сборкой магнитов.

Моделирование выполнено методом конечных элементов с использованием неизотермической А-Т формулировки нестационарных уравнений Максвелла [31]. При решении задач в А-Т формулировке решатель использует две переменные состояния: компоненты токового векторного потенциала \mathbf{T} и компоненты магнитного векторного потенциала \mathbf{A} . Токовый потенциал применяется к сверхпроводящим областям для решения задачи о распределении плотности тока \mathbf{J} в сверхпроводнике:

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T}. \quad (1)$$

Управляющее уравнение системы для сверхпроводящих доменов представляет собой закон Фарадея:

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= \nabla \times \left(E_0 \left(\frac{|\mathbf{J}|}{J_c(B, T)} \right)^n \frac{\mathbf{J}}{J_c(B, T)} \right) = \\ &= \nabla \times \left(E_0 \left(\frac{|\nabla \times \mathbf{T}|}{J_c(B, T)} \right)^n \frac{\nabla \times \mathbf{T}}{J_c(B, T)} \right) = \frac{-\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $E = \rho \times J$ – напряжённость электрического поля, E_0 – критерий, равный 1 мкВ/см, \mathbf{T} – токовый векторный потенциал, T – абсолютная температура, \mathbf{B} – индукция магнитного поля, t – время. Сопротивление ρ сверхпроводника рассчитывается согласно степенному закону для нелинейной вольтамперной характеристики (ВАХ) сверхпроводника [32] с показателем степени $n = 30$. Для учета зависимости критического тока лент $J_c(B, T)$ от температуры T и амплитуды магнитного поля B используется интерполяционная экспериментальная поверхность для лифт-фактора критического тока лент [33].

В основе описания физики тепловых процессов заложено нестационарное уравнение теплового баланса:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \times (-k \nabla T) = Q + \rho C_p \mathbf{w} \nabla T, \quad (3)$$

где в качестве зависимой переменной выступает абсолютная температура T , C_p – теплоемкость при постоянном давлении, ρ – плотность, k – коэффициент теплопроводности, \mathbf{w} – поле скорости температур, Q – все источники тепла, включая термоэлектрические. Температурные зависимости свойств основных слоев ВТСП лент вводятся в рамках модели в виде интерполяций экспериментальных данных [34-39]. Для каждого из моделируемых слоев учитываются экспериментально измеренные зависимости теплопроводностей k и теплоемкостей C_p от температуры T , а также температурные зависимости сопротивлений для несверхпроводящих слоев [40]. В рамках проведенного исследования ВТСП ленты охлаждаются путем погружения в жидкий азот [41].

Процесс намагничивания стопки 50 ВТСП лент осуществляется следующим образом: предварительно ВТСП элементы размещаются на некоторой высоте FCH от поверхности магнитной сборки. Начальное распределение магнитного поля в стопках лент соответствует распределению магнитного поля стопки ПМ на заданной высоте (режим FC).

При расчете вертикальной силы ВТСП элемент начинает приближаться к сборке ПМ вдоль вертикальной оси OZ со скоростью 1 мм/с до минимальной

высоты 5 мм от поверхности сборки, после чего удаляется от магнитной сборки в обратном направлении с такой же скоростью до максимальной высоты 60 мм.

При расчете латеральной силы левитации стопка ВТСП лент перемещается из начального положения на 15 мм вдоль горизонтальной оси ОХ со скорость 1 мм/с, после чего возвращается в исходное положение с такой же скоростью.

2. Результаты и обсуждение

Экспериментальное измерение вертикальной и латеральной сил магнито-левитационного взаимодействия между стопкой 50 ВТСП лент и стопкой 3 ПМ было выполнено при охлаждении жидким азотом для различных начальных высот FCH охлаждения стопки: 6 мм, 7 мм, 8 мм, 10 мм, 14 мм, 18 мм, 22 мм, 40 мм, 60 мм. Расчетные исследования были выполнены для аналогичной эксперименту геометрии магнитной системы с FCH, варьируемой от 6 мм до 60 мм с шагом 0.5 мм.

На Рис. 2 представлена результирующая зависимость максимальной отталкивающей силы от высоты охлаждения стопки в режиме FC, а также отдельные нагрузочные характеристики подвеса при вертикальных смещениях. Результаты расчетов с хорошей точностью согласуются с результатами экспериментальных исследований. Наблюдается тенденция снижения ширины петли гистерезиса при уменьшении высоты заморозки ВТСП элемента. Но наиболее важным результатом, на котором акцентируется внимание в данной работе, является рост максимальной отталкивающей левитационной силы при увеличении начальной высоты FCH

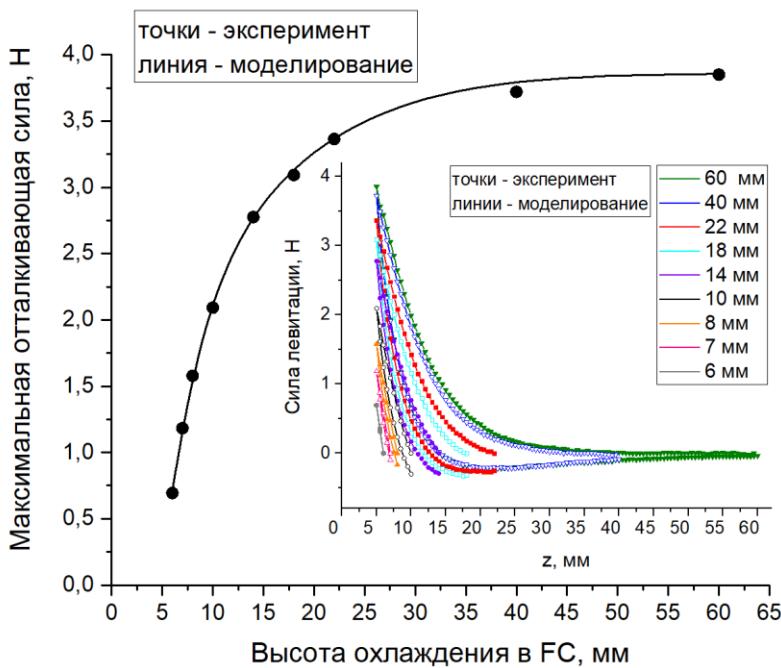


Рис. 2. Зависимость максимальной отталкивающей левитационной силы при вертикальном смещении стопки ВТСП лент от высоты захолаживания FCH ВТСП элемента в режиме FC. На вставке: Зависимости силы левитации при вертикальном смещении стопки ВТСП лент от величины левитационного зазора для различных начальных высот FCH захолаживания ВТСП элемента в режиме FC.

Полученный результат обусловлен ростом величины захваченного магнитного потока, который определяется полной магнитной предысторией сверхпроводника. При увеличении FCH начальная конфигурация магнитного потока формируется в условиях более слабого магнитного поля, но с большей неоднородностью. Следует отметить, что при начальной величине магнитного зазора 60 мм для исследуемой конфигурации магнитной системы внешнее магнитное поле практически полностью отсутствует, и расчет демонстрировал нулевое начальное распределение магнитного поля в объеме стопки ВТСП лент. Фактически, это означает, что при $FCH = 60$ мм образец намагничивается в режиме охлаждения в нулевом поле (ZFC). В процессе вертикального перемещения ВТСП элемента (подвода к магниту) внешнее магнитное поле значительно возрастает, что усиливает отталкивающую силу. Поскольку захваченный поток определяется полной магнитной предысторией сверхпроводника, начальное состояние с более высоким FCH позволяет

системе использовать более широкий диапазон изменения магнитного поля, что приводит к росту максимальной отталкивающей силы.

Вместе с тем поведение латеральной силы левитации в рассматриваемой магнитной системе существенным образом отличается. На Рис. 3 приведены экспериментальные и расчетные зависимости максимальной возвращающей силы при боковых (латеральных) перемещениях стопки, а также латеральные нагрузочные характеристики стопки ВТСП лент для различных высот охлаждения для первого цикла бокового отвода/подвода образца относительно стопки постоянных магнитов. Результаты расчетов с хорошей точностью согласуются с экспериментальными данными. В отличие от случая вертикальных смещений, при боковых сдвигах гистерезис нагрузочных кривых растет с увеличением FCH. При этом максимальные возвращающие силы с ростом высоты заморозки снижаются.

Латеральная сила левитации определяется распределением магнитного поля в поперечном направлении (вдоль оси x) и его взаимодействием с захваченным магнитным потоком в ВТСП элементе. При этом непосредственное влияние на величину возвращающей силы оказывает уже не столько градиент внешнего магнитного поля, сколько его величина. При вертикальных смещениях при подводе внешнее поле увеличивается, что позволяет ВТСП элементу использовать широкий диапазон изменения возрастающего поля для захвата дополнительного магнитного потока. При боковых же смещениях (при отводе образца от магнита) внешнее поле только уменьшается, поэтому решающее влияние на величину возвращающей силы оказывает именно начальное распределение магнитного поля в объеме образца. Это приводит к тому, что максимальная сила левитации наблюдается при охлаждении стопки ВТСП лент на меньших FCH.

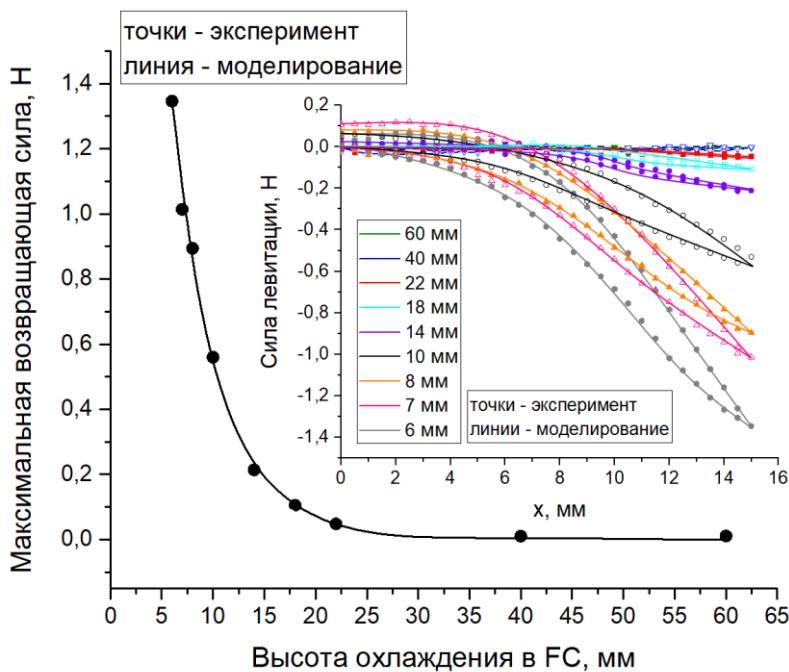


Рис. 3. Зависимости максимальной латеральной левитационной силы при горизонтальных смещениях стопки ВТСП лент от высоты захолаживания в режиме FC. На вставке: Зависимости силы левитации при латеральном смещении ВТСП от величины левитационного зазора для различных начальных высот СН захолаживания ВТСП элемента в режиме FC.

Таким образом, проведённый в рамках представленной работы анализ экспериментальных и численных данных показал хорошее качественное согласие между измеренными и рассчитанными зависимостями вертикальных и латеральных сил левитации. Установлено, что с увеличением высоты захолаживания (FCH) максимальная вертикальная левитационная сила возрастает, тогда как максимальная возвращающая сила при латеральных смещениях уменьшается. Такая противоположная тенденция указывает на существование баланса между несущей способностью подвеса и его устойчивостью, определяемого распределением захваченного магнитного потока и магнитной предысторией сверхпроводника.

Заключение

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований вертикальных и латеральных характеристик простого левитационного подвеса на основе композитных ВТСП лент YBCO.

Для исследования была выбрана базовая конфигурация ВТСП подвеса, состоящая из стопки ВТСП лент и стопки постоянных цилиндрических NdFeB магнитов. Экспериментальные измерения сил магнито-левитационного взаимодействия между стопкой из 50 ВТСП лент и стопкой из 3 постоянных магнитов проводились при охлаждении жидким азотом для ряда фиксированных высот захолаживания: 6 мм, 7 мм, 8 мм, 10 мм, 14 мм, 18 мм, 22 мм, 40 мм и 60 мм. Для моделирования аналогичной системы расчеты выполнялись методом конечных элементов в А-Т-формализме с учетом той же геометрии магнитной системы, где FCH изменялась в диапазоне от 6 мм до 60 мм с шагом 0.5 мм.

В результате проведенного исследования получены вертикальные и латеральные нагрузочные характеристики ВТСП подвеса, построены зависимости максимальных левитационных сил от высоты захолаживания. Показано, что максимальная отталкивающая сила левитации при вертикальных смещениях ВТСП элемента нелинейно возрастает с ростом высоты заморозки FCH, в то время как максимальная возвращающая сила при латеральных смещениях так же нелинейно убывает с ростом FCH. Таким образом, между вертикальной и латеральной компонентами левитационного взаимодействия наблюдается выраженная обратная корреляция, отражающая баланс между несущей способностью подвеса и его устойчивостью. Полученные тенденции обусловлены особенностями взаимодействия градиентного магнитного поля с захваченным образом магнитным потоком и влиянием магнитной предыстории сверхпроводника на его магнито-силовые характеристики.

Понимание влияния FCH на левитационные свойства ВТСП стопки открывает возможности для управления характеристиками левитационных систем путем простого изменения условий их предварительного охлаждения. Полученные данные о зависимости левитационных характеристик от высоты захолаживания могут быть использованы как отправная точка для проектирования и оптимизации более сложных магнитных систем, таких как подшипники для кинетических накопителей энергии или транспортные

платформы. Таким образом, полученные в рамках представленной работы результаты могут быть использованы для оптимизации конструкций сверхпроводниковых подвесов и опор, а также для разработки новых подходов к управлению их характеристиками.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00394, <https://rscf.ru/project/23-19-00394/>

Литература

1. Slininger T. S., et al. An Overview on Passive Magnetic Bearings // 2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2021. – C. 1-8. <https://doi.org/10.1109/IEMDC47953.2021.9449571>
2. Huang T., Zheng M., Zhang G. A Review of Active Magnetic Bearing Control Technology // 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2019. – C. 2888-2893. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2019.8833062>
3. Supreeth D. K., et al. A Review of Superconducting Magnetic Bearings and Their Application // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2022. – T. 32, № 3. – C. 1-15. <https://doi.org/10.1109/TASC.2022.3156813>
4. Namburi D. K., Shi Y., Cardwell D. A. The processing and properties of bulk (RE) BCO high temperature superconductors: current status and future perspectives // Superconductor Science and Technology. – 2021. – T. 34, № 5. – C. 053002. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/abde88>
5. Hussein A. A. A., Hussein A. M. A., Hasan N. A. Study of the properties of YBCO superconductor compound in various preparation methods: a short review // Journal of Applied Sciences and Nanotechnology. – 2023. – T. 3, № 1. – C. 65-79. <https://doi.org/10.53293/jasn.2022.4867.1156>
6. Ogawa N., Hirabayashi I., Tanaka S. Preparation of a high-Jc YBCO bulk superconductor by the platinum doped melt growth method // Physica C: Superconductivity. – 1991. – T. 177, № 1. – C. 101-105. [https://doi.org/10.1016/0921-4534\(91\)90304-H](https://doi.org/10.1016/0921-4534(91)90304-H)

7. Sass F., et al. Superconducting magnetic bearings with bulks and 2G HTS stacks: comparison between simulations using H and A-V formulations with measurements // Superconductor Science and Technology. – 2018. – T. 31, № 2. – C. 025006. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aa9dc1>
8. Osipov M., et al. Scalable superconductive magnetic bearing based on non-closed CC tapes windings // Superconductor Science and Technology. – 2021. – T. 34, № 3. – C. 035033. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/abda5a>
9. Coombs T. A., et al. High-temperature superconductors and their large-scale applications // Nature Reviews Electrical Engineering. – 2024. – T. 1, № 12. – C. 788-801. <https://doi.org/10.1038/s44287-024-00112-y>
10. Kurbatova E., et al. Comparison of properties of a bulk HTS and a stack of HTS tapes after FC and ZFC // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – T. 1559, № 1. – C. 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1559/1/012049>
11. Mukoyama S., et al. Development of superconducting magnetic bearing for 300 kW flywheel energy storage system // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2017. – T. 27, № 4. – C. 1-4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2652327>
12. Miyazaki Y., et al. Development of superconducting magnetic bearing for flywheel energy storage system // Cryogenics. – 2016. – T. 80. – C. 234-237. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2016.05.011>
13. Oliveira R., et al. HTS-tape magnetic bearing for ultra high-speed turbo motor // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2023. – T. 33, № 5. – C. 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2023.3253064>
14. Kummeth P., et al. Development and characterization of magnetic HTS bearings for a 400 kW synchronous HTS motor // Superconductor Science and Technology. – 2004. – T. 17, № 5. – C. S259. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/17/5/032>
15. Yang W., et al. Low frequency rotational loss in a high-temperature superconducting bearing and its application in micro-thrust measurement for space propulsion // Superconductor Science and Technology. – 2019. – T. 33, № 1. – C. 014001. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab58b9>

16. Sakurai Y., et al. Half-meter scale superconducting magnetic bearing for cosmic microwave background polarization experiments // Journal of Physics: Conference Series – T. 1590. – C. 012060. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1590/1/012060>
17. Ye M., et al. Effect of temperature on rotation loss in a superconducting device for microthrust measurement of electric propulsion system // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2015. – T. 25, № 3. – C. 1-4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2015.2393555>
18. Gao L., et al. High-Temperature Superconducting Magnetic Levitation With the Halbach Array and V-Shaped Combined Permanent Magnet Guideway // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2024. – T. 34, № 7. – C. 1-8. <https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3432110>
19. Ozturk K., et al. Experimental and Numerical Investigation of Levitation Force Parameters of Novel Multisurface Halbach HTS–PMG Arrangement for Superconducting Maglev System // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2021. – T. 31, № 7. – C. 1-12. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3106816>
20. Irina A., et al. Modeling of magnetization and levitation force of HTS tapes in magnetic fields of complex configurations // Superconductor Science and Technology. – 2019. – T. 32, № 10. – C. 105001. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab2bbe>
21. Rudnev I., et al. The influence of cyclical lateral displacements on levitation and guidance force for the system of coated conductor stacks and permanent magnets // Materials Research Express. – 2019. – T. 6, № 3. – C. 036001. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaf7ae>
22. Osipov M., et al. Investigation of HTS Tape Stacks for Levitation Applications // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2016. – T. 26, № 4. – C. 1-1. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2541610>

23. Osipov M., et al. Influence of temperature on levitation characteristics of the system CC tapes – Permanent magnets at lateral displacements // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – T. 546. – C. 168896. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168896>
24. Suzuki T., et al. Temperature Dependency of Levitation Force and Its Relaxation in HTS // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – T. 17, № 2. – C. 3020-3023. <https://doi.org/10.1109/TASC.2007.899403>
25. Erdem O., et al. Effects of Initial Cooling Conditions and Measurement Heights on the Levitation Performance of Bulk MgB₂ Superconductor at Different Measurement Temperatures // Journal of Low Temperature Physics. – 2014. – T. 177, № 1. – C. 28-39. <https://doi.org/10.1007/s10909-014-1183-8>
26. Abdioglu M., et al. Levitation and guidance force efficiencies of bulk YBCO for different permanent magnetic guideways // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – T. 630. – C. 260-265. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.044>
27. Zheng X., Yang Y. Transition Cooling Height of High-Temperature Superconductor Levitation System // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – T. 17, № 4. – C. 3862-3866. <https://doi.org/10.1109/TASC.2007.910150>
28. Molodyk A., et al. Development and large volume production of extremely high current density YBa₂Cu₃O₇ superconducting wires for fusion // Scientific Reports. – 2021. – T. 11, № 1. – C. 2084. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81559-z>
29. Lee S., et al. Development and production of second generation high T_c superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables // Superconductor Science and Technology. – 2014. – T. 27. – C. 044022. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/27/4/044022>
30. Ghabeli A., et al. 3D modeling and measurement of HTS tape stacks in linear superconducting magnetic bearings // Superconductor Science and Technology. – 2024. – T. 37, № 6. – C. 065003. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ad3c9a>

31. Huber F., et al. The T-A formulation: an efficient approach to model the macroscopic electromagnetic behaviour of HTS coated conductor applications // Superconductor Science and Technology. – 2022. – Т. 35, № 4. – С. 043003. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac5163>
32. Pokrovskii S. V., Martirosian I. V., Aleksandrov D. A. Numerical 3D modeling of magnetic systems based on closed superconducting rings // Modern Transportation Systems and Technologies. – 2024. – Т. 10, № 4. – С. 537-555. <https://doi.org/10.17816/transsyst637429>
33. Molodyk A., et al. Development and large volume production of extremely high current density YBa₂Cu₃O₇ superconducting wires for fusion // Scientific Reports. – 2021. – Т. 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81559-z>
34. Ahlers G. Heat Capacity of Copper // Review of Scientific Instruments. – 1966. – Т. 37, № 4. – С. 477-480. <https://doi.org/10.1063/1.1720219>
35. Bonura M., Senatore C. High-field thermal transport properties of REBCO coated conductors // Superconductor Science and Technology. – 2015. – Т. 28, № 2. – С. 025001. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/28/2/025001>
36. Ikebe M., et al. Anisotropic Thermal Diffusivity and Conductivity of YBCO(123) and YBCO(211) Mixed Crystals. II // Japanese Journal of Applied Physics. – 1994. – Т. 33, № 11R. – С. 6157. <https://doi.org/10.1143/JJAP.33.6157>
37. Matula R. A. Electrical resistivity of copper, gold, palladium, and silver // Journal of Physical and Chemical Reference Data. – 1979. – Т. 8, № 4. – С. 1147-1298. <https://doi.org/10.1063/1.555614>
38. Smith D., Fickett F. R. Low-Temperature Properties of Silver // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. – 1995. – Т. 100. <https://doi.org/10.6028/jres.100.012>
39. Zou S., Zermeño V. M. R., Grilli F. Simulation of Stacks of High-Temperature Superconducting Coated Conductors Magnetized by Pulsed Field Magnetization Using Controlled Magnetic Density Distribution Coils // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2016. – Т. 26, № 3. – С. 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2520210>

40. Van Nugteren J. Normal zone propagation in a YBCO superconducting tape // University of Twente: Enschede, The Netherlands. – 2012.
41. Zubko V. V., et al. Heat Transfer Simulation to Liquid Nitrogen from HTS Tapes at the Overload Currents // Physics Procedia. – 2015. – Т. 67. – С. 619-624.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.06.105>

Для цитирования:

Мартиросян И.В., Александров Д.А., Старицкий А.С., Осипов М.А. Покровский С.В. Влияние высоты охлаждения в магнитном поле на левитационные характеристики стопки ВТСП лент. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.48>