
**ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ**

УДК 538.955

**МАГНИТО-ЛЕВИТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ
ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ–СТОПКИ ВТСП-ЛЕНТ
С РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ**

© 2022 г. И. В. Анищенко^а, *, М. А. Осипов^а, С. В. Покровский^а,
Д. А. Абин^а, А. С. Стариковский^а, И. А. Руднев^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: mephizic@gmail.com

Поступила в редакцию 10.12.2020 г.

После доработки 13.01.2021 г.

Принята к публикации 03.08.2021 г.

Сложенные в стопки композитные высокотемпературные сверхпроводящие ленты (ВТСП-ленты) являются перспективным материалом для разработки систем магнитной левитации, таких как левитационный транспорт, подшипники, кинетические накопители энергии. При использовании сверхпроводника в переменных полях неизбежны энергетические потери вследствие в сверхпроводнике тепла, приводящего к уменьшению критического тока и, как следствие, силы левитации. Одним из ключевых преимуществ стопок ВТСП-лент над традиционными объемными ВТСП является наличие металлических металлической подложки и слоев серебра и меди, что приводит не только к высокой прочности, но и хорошей теплопроводности стопок, что позволяет эффективно отводить выделяемое тепло. Актуальной задачей является исследование механизмов управления тепловыми характеристиками систем, а также разработка эффективных методов контроля параметров теплопередачи системы при различных скоростях ввода внешнего магнитного поля. В данной работе приведены результаты расчета поведения стопки ВТСП-лент во внешнем магнитном поле методом конечных элементов, реализованного с использованием пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics. Проведены исследования управления тепловыми характеристиками левитационной системы, а также разработаны эффективные методы контроля параметров теплопередачи системы при различных скоростях ввода внешнего магнитного поля. Показано, что улучшения тепловых, и как следствие, левитационных свойств системы можно достичь за счет как изменения архитектуры самих стопок, так использования различных конфигураций криогенной системы охлаждения. Рассмотрены различные варианты реализации криокулерной системы охлаждения, а также различные конфигурации стопок при охлаждении жидким азотом. Показано, что охлаждение жидким азотом является эффективным до тех пор, пока изменение температуры в системе не превышает 3К. В случае безжидкостного охлаждения стопки оптимальной является конфигурация с боковым охлаждением. Наличие механического канала охлаждения в виде отверстия в случае низких скоростей ввода магнитного поля приводит либо к ухудшению характеристик системы, либо не влияет на ее свойства. При увеличении скорости ввода внешнего магнитного поля наличие механического канала охлаждения приводит к увеличению максимальной силы левитации.

Ключевые слова: ВТСП, ленточные композиты, стопки, магнитная левитация, метод конечных элементов

DOI: 10.56304/S2079562922010031

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все более широкое распространение получают разработки в области создания систем на основе магнитной левитации, таких как левитационный транспорт, сверхпроводящие подшипники, кинетические накопители энергии, моторы и генераторы [1–5]. Основным элементом таких систем являются высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) на основе соединения $REBa_2Cu_3O_{7-x}$ или REBCO (RE – ред-

коземельный элемент). Наиболее распространено использование REBCO ВТСП в левитационных системах в виде объемных керамических моно- или поликристаллов, именуемых объемными ВТСП (от англ. bulk). Однако такие материалы обладают рядом недостатков, одним из которых является низкая теплопроводность REBCO ВТСП. Данная проблема может быть решена использованием альтернативных материалов на основе REBCO ВТСП. Развитие технологии создания высокотемпературных сверхпроводящих лент – (ВТСП-лент) в по-

следние годы позволяет использовать их как альтернативу объемным сверхпроводникам [6]. Данные ленты представляют собой слоистую структуру, содержащую прочную металлическую подложку, слой сверхпроводника, а также слои меди и серебра с хорошей теплопроводностью. ВТСП-ленты могут быть сложены с стопки, имеющие высокую термическую и механическую стабильность, а левитационные характеристики стопки лент сопоставимы с объемными ВТСП [6–8]. Физические и механические свойства, а также высокая коммерческая доступность ВТСП-лент делают стопки ВТСП-лент привлекательной альтернативой объемным ВТСП в сверхпроводящих левитационных системах.

При использовании стопок ВТСП-лент в переменных полях неизбежны энергетические потери вследствие перемагничивания и возникающего внутри лент тепла, приводящего к уменьшению критического тока и, как следствие, силы левитации. Использование различных стабилизирующих слоев может оказывать сильное влияние на левитационные характеристики стопок ВТСП-лент [9]. Однако слоистая структура лент делает весьма сложной задачей анализ теплового поведения стопок ВТСП-лент. Актуальной задачей является исследование механизмов управления тепловыми характеристиками системы, а также разработка эффективных методов контроля параметров теплопередачи системы при различных скоростях ввода внешнего магнитного поля. Улучшения тепловых, и как следствие, левитационных свойств системы можно достичь за счет изменения архитектуры стопок, использования разрезных конфигураций, создания дополнительных механических каналов охлаждения в виде отверстий, применения дополнительных теплопроводящих прослоек и т.д. Данная работа посвящена исследованию влияния архитектуры стопок ВТСП-лент и различных способов охлаждения на их тепловые характеристики и, как следствие, на силу левитации при различных температурах. Приведены результаты расчета поведения стопки ВТСП-лент во внешнем магнитном поле методом конечных элементов, реализованного с использованием пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics. Рассмотрены различные варианты реализации криокулерной системы охлаждения, а также различные конфигурации стопок при охлаждении жидким азотом.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для расчета поведения стопки ВТСП-лент во внешнем магнитном поле применяется метод конечных элементов, реализованный с использованием формы общих дифференциальных уравнений (PDE) пакета программного обеспечения

Comsol Multiphysics. Подробное описание методики расчета представлено в работе [10].

Было рассмотрено две системы охлаждения: охлаждение криокулером и охлаждение жидким азотом.

Базовая геометрия моделируемой левитационной системы с криокулерным охлаждением приведена на рис. 1. В качестве образцов ВТСП-лент рассматривались композитные структуры, которые в рамках модели содержат слои подложки, ВТСП, меди и серебра. В общем случае толщина слоя подложки сплава Хастеллой С-276 составляет 0.1 мм, толщина сверхпроводящего слоя REBCO (где RE-редкоземельный элемент) – 1 мкм, толщина слоя серебра – 3 мкм, слоя меди – 30 мкм, высота стопки – 50 лент. Рассмотрены ВТСП-ленты с критическим током 300 и 650 А, лифт-фактор моделируемых ВТСП-лент приведен на рис. 2. Показатель степени вольт-амперной характеристики лент в рамках модели зависит от величины внешнего магнитного поля и варьируется от 27 в слабых магнитных полях до 22 – в более сильных. Намагничивание стопки ВТСП-лент выполнялось при температурах 30, 50, 77.4 К. В качестве источника внешнего магнитного поля выступает постоянный Nb–Fe–В магнит диаметра 30 мм, высоты 10 мм с остаточной индукцией магнитного поля на поверхности – 0.38 Тл. 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). Скорость ввода магнитного поля при намагничивании варьировалась от 0.05 до 20 Тл/с. В рамках модели криокулерная система охлаждения представляет собой массивную медную головку, мощность теплоотвода которой соответствует мощности реальной криокулерной системы охлаждения

Изменение параметров теплопередачи достигалось как за счет влияния на свойства самой стопки ВТСП-лент, так и за счет изменения характеристик криогенной системы. Для левитационной системы, представленной на рис. 1 были рассмотрены шесть способов реализации системы охлаждения стопки, которые представлены на рис. 3.

В случае охлаждения жидким азотом управление тепловыми характеристиками системы осуществлялось посредством изменения геометрии стопки. Рассматривались две геометрии – целая стопка и стопка с отверстием. Стопка с отверстием аналогична конфигурации 5 криокулерного охлаждения, но охлаждение жидким хладагентом происходит по всему периметру стопки и внутри полого отверстия, диаметр и высота которого ва-

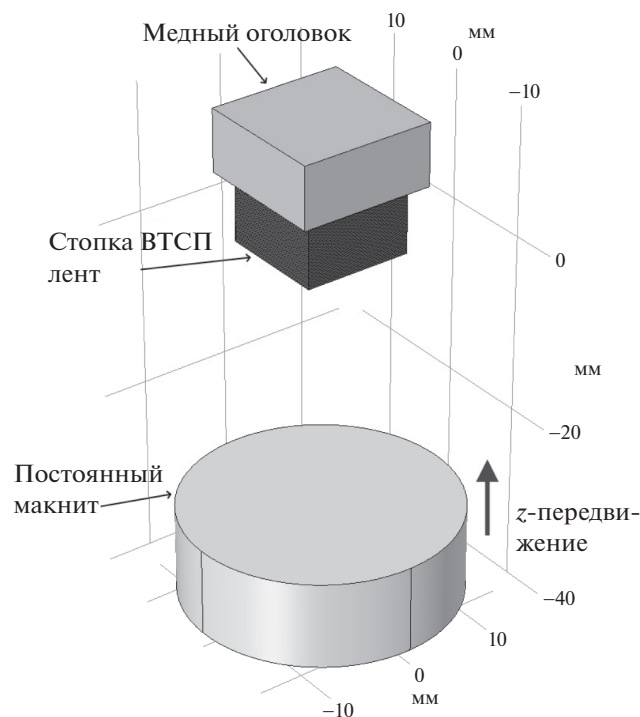


Рис. 1. Конфигурация левитационной системы.

рируется. Тепловой анализ сводится к определению эффективного коэффициента теплоотдачи в хладагент, при этом численная модель учитывает гистерезисный характер кривой кипения жидкого азота, возможность многократной смены ре-

жимов кипения, наличие тепловой задержки начала пузырькового кипения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Перейдем к рассмотрению влияния конфигурации системы охлаждения на левитационные свойства стопки ВТСП-лент. Наименее удачной из конфигураций, рассмотренных на рис. 3, является первая конфигурация. При увеличении высоты стопки ВТСП-лент расчет показал снижение захваченного потока и, как следствие, силы левитации, обусловленное нагревом слоев, наиболее приближенных к магниту и одновременно наиболее отдаленных от теплоотводящей медной головки (рис. 4). Поскольку магнит приближается к стопке снизу, нижние слои стопки первыми оказываются во внешнем магнитном поле, поэтому именно в них в первую очередь начинается тепловыделение. Далее магнитное поле начинает проникать в ленты с краев, поэтому на краях стопки зарождается “тепловое пятно”, которое при дальнейшем увеличении внешнего поля продолжает проникать внутрь стопки с двух сторон. При этом в момент максимального приложенного поля наиболее нагретым оказывается самый центр стопки, поскольку по периметру стопки тепловыделение в значительной мере компенсируется системой охлаждения. Наличие этого “теплового пятна” сказывается на значении захваченного магнитного потока. Чем больше высота стопки, тем существеннее оказывается это влияние, поскольку, чем больше суммарная толщина стопки, тем тяжелее охладить ее равномерно. Конфигурации 2–

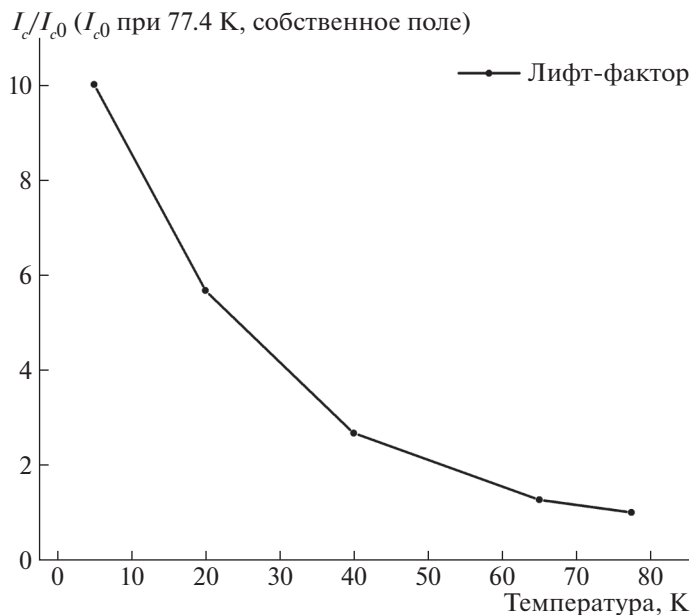


Рис. 2. Лифт-фактор моделируемых ВТСП-лент.

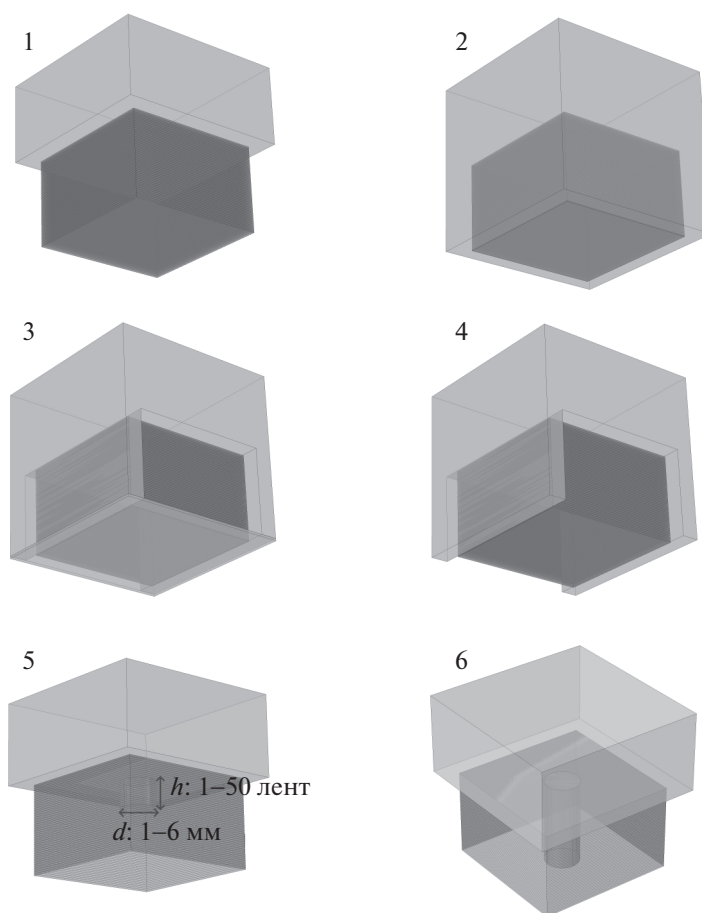


Рис. 3. Конфигурации систем для безжидкостного охлаждения стопки ВТСП-лент.

4 приводят к одинаковым значениям левитационной силы во всем интервале температур. В качестве примера на рис. 5 приводятся распределения температур в стопке 50 ВТСП-лент для конфигураций криокулерной системы 1 и 4 при начальной температуре 77.4 К и скорости ввода магнитного поля 0.05 Тл/с. Конфигурация 4 обладает ярко выраженным градиентом в распределении температуры, однако величина изменения температуры составляет сотые доли кельвина, тогда как изменение температуры для первой конфигурации составляет ~1.5 К. При увеличении скорости ввода внешнего поля вид распределений качественно не изменится. Однако уже при скорости ввода поля 30 Тл/с максимальное изменение температуры для 4 конфигурации составит 6 К, а для 1 конфигурации – 22 К.

Перейдем к сравнению криокулерного охлаждения с различными конфигурациями охлаждения жидким азотом. При низких скоростях ввода магнитного поля силы левитации при охлаждении азотом и криокулером до температуры 77.4 К в конфигурациях 2–4 полностью совпадают. Охлаждение жидким азотом является эффектив-

ным вплоть до того момента, пока изменение температуры в системе не превышает 3 К. Как только температуры в системе начинают изменяться сильнее, процессы интенсивного кипения хладагента и многократной смены режимов его кипения приводят к снижению эффективности теплопередачи в окружающий тепловой резервуар. Таким образом, конфигурация криокулерной системы 4 является наиболее универсальной при различных скоростях ввода магнитного поля. Данная конфигурация может быть дополнительно усовершенствована путем создания в центре стопки механического канала охлаждения аналогично конфигурациям 5 и 6.

Было проведено исследование влияния размера центрального отверстия на левитационные свойства системы в широком интервале температур при различных скоростях ввода поля. На рис. 6 представлено распределение захваченного магнитного потока целой стопкой ВТСП-лент при охлаждении криокулером до температур 30, 50 и 77.4 К (скорость ввода магнитного поля 0.05 Тл/с). При низких скоростях изменения магнитного поля тепловые процессы не оказывают влияния на

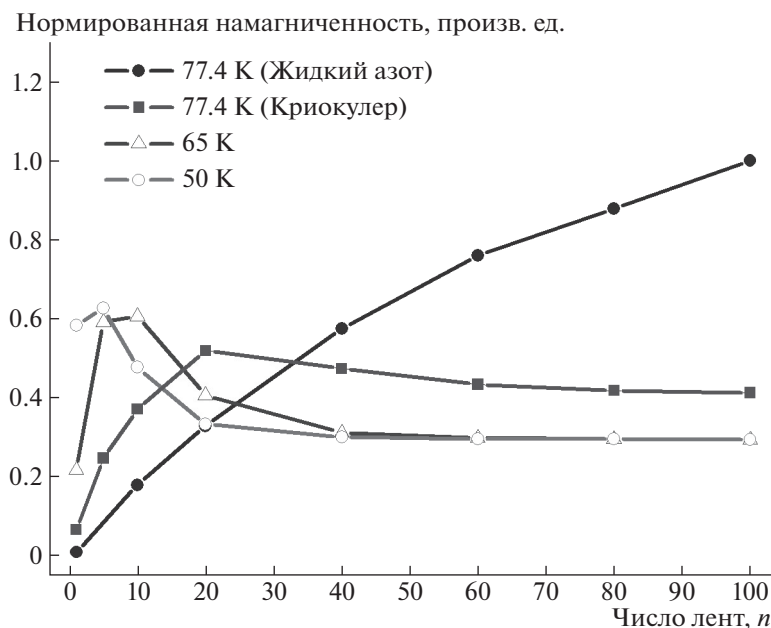


Рис. 4. Нормированные зависимости намагниченности от числа лент в стопке для стопок с параметрами ВТСП-лент фирмы SuperOx. Охлаждение криокулером в конфигурации 1 и жидким азотом.

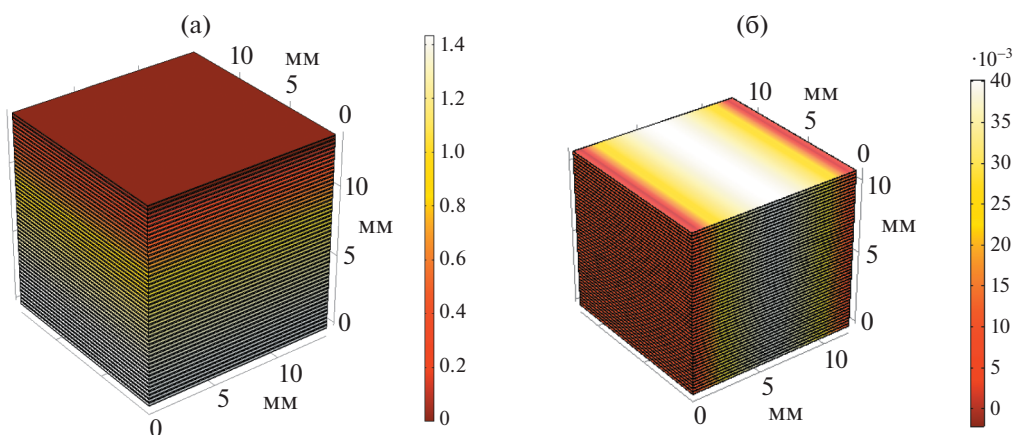


Рис. 5. Конечное распределение температуры $T - T_0$ для конфигураций 1 (а) и 4 (б) криокулерной системы с рис. 3. T — текущая температура, T_0 — начальная температура образца (77.4 K). Скорость ввода поля 0.05 Тл/с.

захваченный магнитный поток и силу левитации. Поэтому при скорости ввода магнитного поля 0.05 Тл/с распределения захваченного магнитного потока при охлаждении с помощью любой из конфигураций безжидкостного охлаждения (см. рис. 3) имеют такой же вид. В этом случае наличие механического канала охлаждения ни в каком случае не приводит к улучшению левитационной способности системы, а лишь уменьшает силу левитации, либо не влияет на нее. Стоит отметить, что для ВТСП-лент с более высокой плотностью критического тока при низких температурах захваченный магнитный поток в центре стопки отсут-

ствует (см. рис. 3). Ввиду этого факта при более быстром вводе магнитного поля наличие механического канала в виде отверстия при охлаждении криокулером приводит к росту силы левитации, при этом чем больше скорость ввода магнитного поля, тем сильнее прирост левитационной силы по сравнению с неповрежденной стопкой лент. Наличие механического канала охлаждения в случае более равномерно намагниченной стопки приводит к снижению силы левитации при любых скоростях ввода магнитного поля. На рис. 7 в качестве примера приведены зависимости силы левитации от диаметра для различных глубин центрального от-

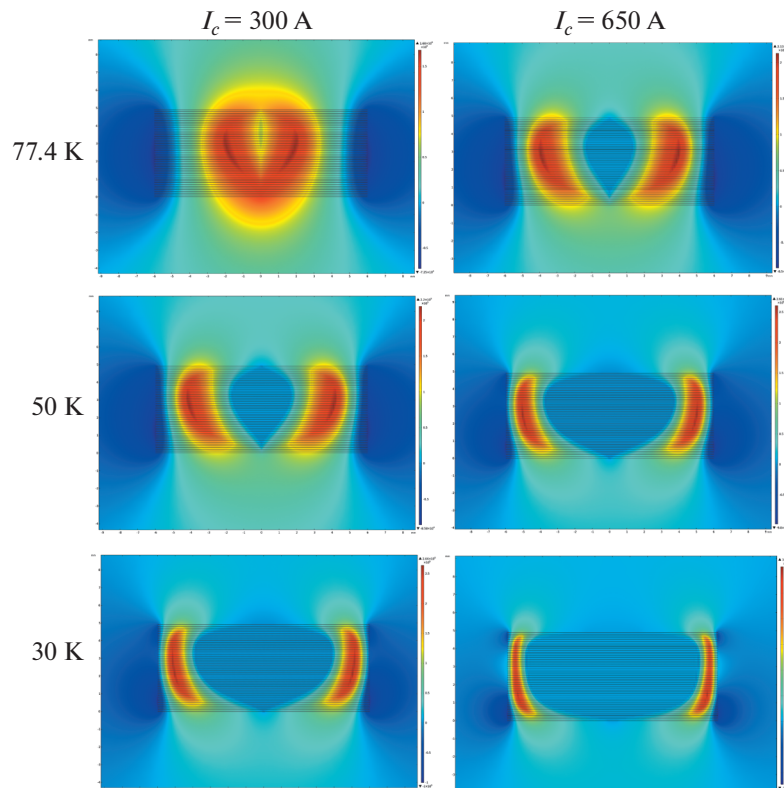


Рис. 6. Распределение захваченного магнитного потока стопками 50 ВТСП-лент с различным критическим током при различных температурах. Скорость намагничивания 0.05 Тл/с. Охлаждение криокулером, конфигурация 4.

верстия при охлаждении стопки 50 лент с критическим током 300 А криокулером до температуры 77.4 К. Скорость ввода магнитного поля при этом составляла 10 Тл/с. Появление дополнительного канала охлаждения в данном случае приводит к снижению силы левитации при любой конфигурации системы (для всех d и h). Однако для аналогичной скорости изменения внешнего поля при охлаждении стопки 50 лент с критическим током 650 А до той же температуры 77.4 К наличие вырезного отверстия приводит к росту силы левитации для глубины дефекта в 10 и 20 лент при диаметрах отверстия 4 и 3 мм соответственно (рис. 8). Это связано с тем, что при таких скоростях изменения поля тепловыделение в системе велико, однако центральная часть стопки ввиду высокого критического тока лент не намагничивается. Удаление центральной части стопки, не принимающей участие в захвате магнитного потока, и использование свободного пространства в качестве канала охлаждения приводит к более эффективному теплоотводу в системе.

При понижении температуры захваченный магнитный поток, а значит, и максимальное тепловыделение, сосредотачиваются ближе к краю стопки, поэтому максимум силы левитации при

использовании механического канала охлаждения смещается в сторону роста диаметра и глубины отверстия. Так, при охлаждении стопки ВТСП-лент с критическим током 650 А до температуры 30 К при скорости ввода магнитного поля 10 Тл/с максимальная сила левитации достигается при глубине отверстия 40 лент, диаметре 6 мм (рис. 9). Оптимальные размеры механических каналов охлаждения были рассчитаны для скоростей ввода поля от 0.05 до 30 Тл/с при температурах от 30 до 77.4 К для стопок ВТСП-лент с критическим током 300 и 650 А. Результаты расчетов максимально возможной силы левитации в сравнении с максимальной силой для целых стопок лент приведены на рис. 10. Спад силы левитации при увеличении скорости ввода поля для высоких температур более резок как для лент с критическим током 300 А, так и для лент с критическим током 650 А. При пониженных температурах ленты в обоих случаях ведут себя более стабильно. Кроме того, рост силы левитации при использовании методов управления тепловыми характеристиками системы при высоких скоростях изменения поля выше, чем при низких. Так, для ВТСП-лент с критическим током 650 А при скорости ввода магнитного поля 30 Тл/с при температуре 30 К максимальный прирост в силе левитации составил

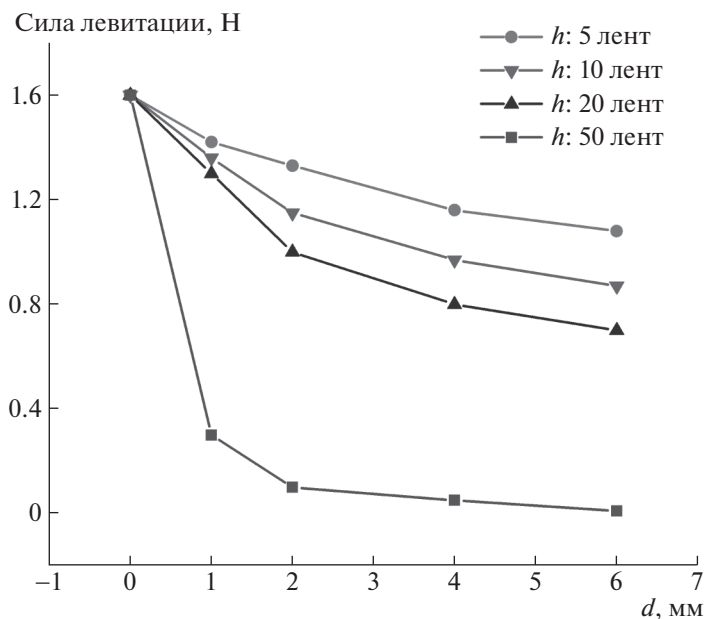


Рис. 7. Зависимости силы левитации от диаметра при различной глубине центрального отверстия для стопки 50 ВТСП-лент (критический ток 300 А). Температура 77.4 К, скорость намагничивания 10 Тл/с. Охлаждение криокулером, конфигурация 4 с добавленным механическим каналом охлаждения.

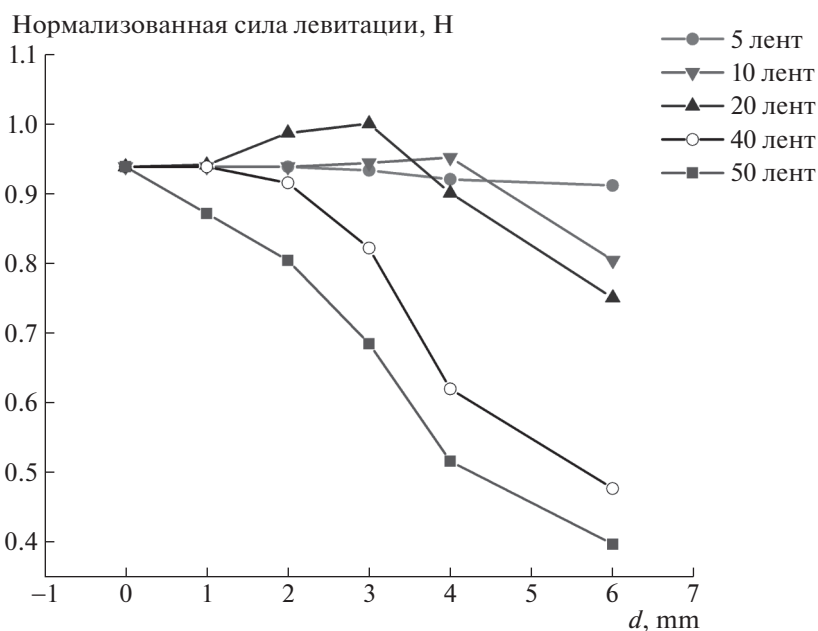


Рис. 8. Зависимости силы левитации от диаметра при различной глубине центрального отверстия для стопки 50 ВТСП-лент (критический ток 650 А). Температура 77.4 К, скорость намагничивания 10 Тл/с. Охлаждение криокулером, конфигурация 4 с добавленным механическим каналом охлаждения.

14%, тогда как при скорости ввода поля 5 Тл/с сила левитации увеличилась всего на 4.5% (рис. 11). Такое поведение системы обусловлено тем, что при низких температурах плотность тока в лентах высока, и чем она выше, тем более существенное влияние на левитационные свойства оказывают пара-

метры теплоотвода. При высоких скоростях ввода поля генерация тепла в ленте происходит гораздо быстрее, и если мощности криогенного оборудования достаточно для эффективного теплоотвода, то наблюдается существенный прирост в силе левитации.

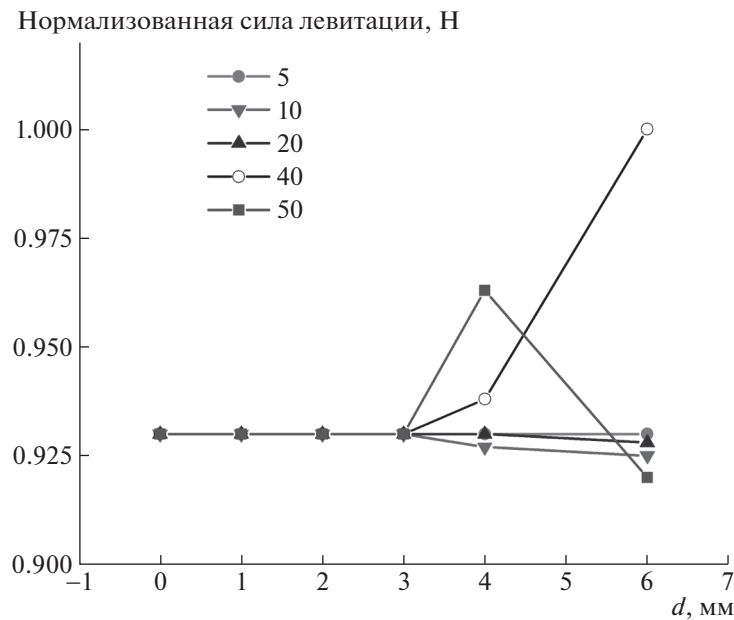


Рис. 9. Зависимости силы левитации от диаметра при различной глубине центрального отверстия для стопки 50 ВТСП-лент (критический ток 650 А). Температура 30 К, скорость намагничивания 10 Тл/с. Охлаждение криокулером, конфигурация 4 с добавленным механическим каналом охлаждения

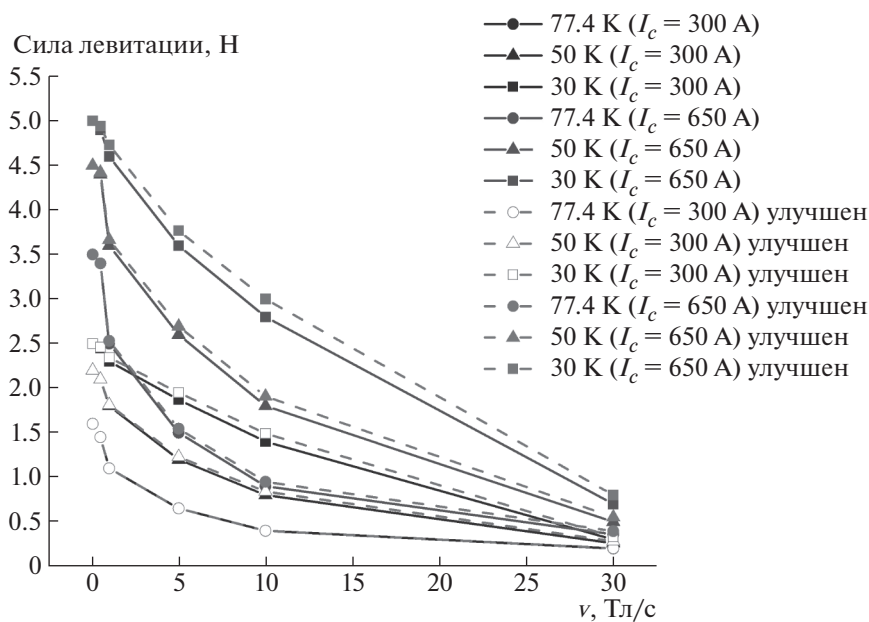


Рис. 10. Зависимости максимальной силы левитации от скорости ввода внешнего магнитного поля при различных температурах для ВТСП-лент с критическим током 300 и 650 А. Сравнение конфигурации 1 и конфигурации 4 с добавленным каналом при оптимальных размерах механических каналов охлаждения (улучшен на легенде).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были проведены исследования управления тепловыми характеристиками левитационной системы, а также разработаны эффективные методы контроля параметров теплопередачи системы при различных скоростях ввода внешне-

го магнитного поля. Исследования проводились путем численного моделирования левитационной системы на основе стопок ВТСП-лент методом конечных элементов с использованием пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics. Рассмотрены различные варианты реализации крио-

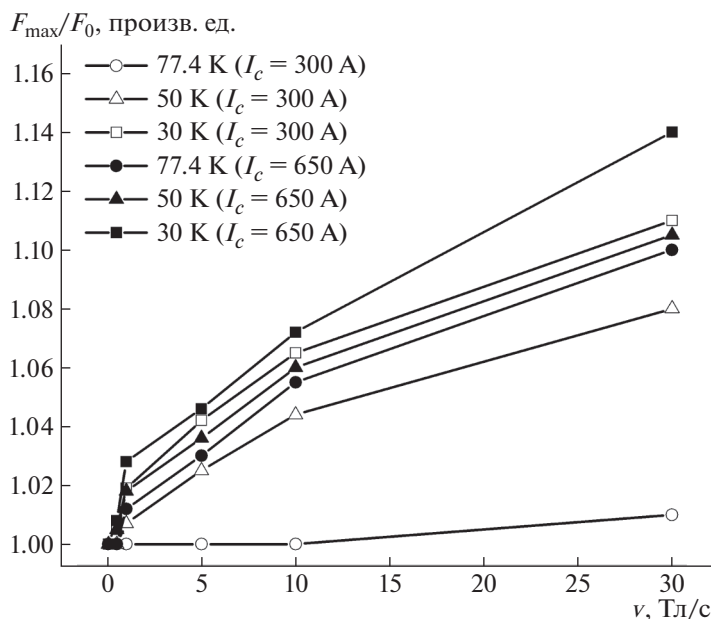


Рис. 11. Относительный прирост силы левитации при различных скоростях ввода внешнего магнитного поля. Охлаждение криокулером, конфигурация 4 с добавленным механическим каналом охлаждения.

кулерной системы охлаждения, а также различные конфигурации стопок при охлаждении жидким азотом. Показано, что улучшения тепловых, и как следствие, левитационных свойств системы можно достичь за счет как изменения архитектуры самих стопок, так использования различных конфигураций криогенной системы охлаждения. На основании полученных результатов численного моделирования можно заключить, что:

1) Охлаждение жидким азотом является эффективным до тех пор, пока изменение температуры в системе не превышает 3К. При превышении этого значения эффективность теплоотдачи в окружающий тепловой резервуар снижается ввиду ухудшения характеристик хладагента при смене режимов кипения.

2) В случае охлаждения стопки ВТСП-лент при помощи криокулера оптимальной является конфигурация с боковым охлаждением.

3) Наличие механического канала охлаждения в виде отверстия в случае низких скоростей ввода магнитного поля приводит либо к ухудшению характеристик системы, либо не влияет на ее свойства.

4) Для случаев более равномерно намагниченной стопки ВТСП-лент наличие дополнительного теплового канала приводит к снижению силы левитации. Это связано с тем, что удаление центральной части стопки в случае, когда в центре стопки имеется захваченный магнитный поток неизбежно приводит к потере объема стопки,

принимающей участие в захвате потока и вносящей существенный вклад в левитационную силу.

5) При низких температурах центральная часть стопки ввиду высокого криттока лент не намагничивается. В таком случае удаление этой части и использование свободного пространства в качестве канала охлаждения приводит к более эффективному теплоотводу в системе и росту силы левитации.

6) При увеличении скорости ввода внешнего магнитного поля наличие механического канала охлаждения приводит к увеличению максимальной силы левитации, притом для ВТСП-лент с более высоким криттоком степень роста силы левитации тем выше, чем быстрее скорость изменения внешнего поля и чем ниже температура.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-19-01527).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Bernstein P., Noudem J. // Supercond. Sci. Technol. 2020. V. 33. P. 033001.
2. Hull J.R. // Supercond. Sci. Technol. 2000. V. 13. No. 2. P. R1.
3. Werfel F.N. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2012. V. 25. No. 1. P. 014007.
4. Miyazaki Y. et al. // Cryogenics (Guildf). 2016. V. 80. P. 234–237.

5. Webster J.G. *et al.* // Wiley Encycl. Electr. Electron. Eng. 2017. P. 1–18.
6. Liu K. *et al.* // Supercond. Sci. Technol. 2018. V. 31. No. 1. P. 015013.
7. Osipov M. *et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016. V. 26. No. 4. P. 3601704.
8. Rudnev I. *et al.* // Mater. Res. Express. 2019. V. 6. No. 3. P. 036001.
9. Pokrovskii S.V., Bura A.A., Anischenko I.V., Rudnev I.A. // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. P. 1503–1507.
10. Anischenko I., Pokrovskii S., Rudnev I., Osipov M. // Supercond. Sci. Technol. 2019. V. 32. P. 105001.

Magnetic Levitation Characteristics of the System of Permanent Magnet Stacks of HTS Tapes of Various Architectures

I. V. Anischenko^{1, *}, M. A. Osipov¹, S. V. Pokrovskii¹,
D. A. Abin¹, A. S. Starikovskii¹, and I. A. Rudnev¹

¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: mephizic@gmail.com*

Received December 10, 2020; revised January 13, 2021; accepted August 3, 2021

Abstract—Stacked composite high-temperature superconducting tapes (HTS tapes) are advanced material for development of magnetic levitation systems such as levitation transport, bearings, and kinetic energy storage. At use of superconductor in variable fields, energy losses owing to existence of heat in superconductor leading to decrease in critical current and, as a consequence, in the levitation force are inescapable. One of the key advantages of stacks of HTS tapes over traditional bulk HTS is the presence of a metal substrate and layers of silver and copper, which leads not only to high strength but also to suitable thermal conductivity of the stacks, which makes it possible to remove released heat efficiently. Investigation of mechanisms of control of thermal properties of the systems, as well as development of efficient methods of checkout of heat transfer parameters of the system at various rates of insertion of an external magnetic field, is a relevant objective. The results of calculation of the behavior of the stack of HTS tapes in an external magnetic field by the finite element method accomplished with use of the Comsol Multiphysics software package are presented in this work. Investigations of control of thermal properties of a levitation system are carried out, and also efficient methods of checkout of the parameters of heat transfer of the system at various rates of insertion of external magnetic field are developed. It is demonstrated that improvement of thermal and, as a consequence, levitation properties of the system can be achieved by the effect of both change in architecture of the stacks themselves and use of various configurations of the cryogenic cooling system. Various alternatives of implementation of the cryocooler cooling system and also various configurations of the stacks at liquid-nitrogen cooling are discussed. It is demonstrated that liquid nitrogen cooling is efficient so far as the change in temperature in the system is less than 3 K. In the case of liquidless cooling of the stack, the configuration with lateral cooling is optimal. The presence of a mechanical cooling passage in the form of a hole in the case of low rates of insertion of the magnetic field either leads to degradation of the system or does not have an effect on its properties. At increase in the rate of insertion of the external magnetic field, the presence of the mechanical cooling passage leads to increase in the maximum levitation force.

Keywords: HTS, layered composites, stacks, magnetic levitation, finite element method