

УДК 621.039.633

ВТСП-НАПРАВЛЯЮЩАЯ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ТРАНСПОРТА КРИОГЕННЫХ ТОПЛИВНЫХ МИШЕНЕЙ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО НОСИТЕЛЯ

И. В. Александрова, Е. Р. Корешева, Е. Л. Кошелев, Т. П. Тимашева

Создание системы бесконтактного позиционирования и транспорта криогенных топливных мишеней (КТМ) представляет собой важную задачу в программе ИТС. В данной работе исследуется возможность построения левитационной системы ускорения магнитного носителя КТМ вдоль сверхпроводящей ленточной направляющей, выполненной из ВТСП материалов.

Ключевые слова: инерциальный термоядерный синтез (ИТС), криогенная топливная мишень (КТМ), высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), магнитный носитель, бесконтактная доставка КТМ.

Введение. Бесконтактная доставка КТМ в зону лазерного облучения позволит перейти к реакторным технологиям подачи топлива, повысить симметрию облучения КТМ и эффективность сжатия топлива по схеме ИТС (КТМ – это полая полимерная оболочка со сферическим слоем из твердородного топлива, вымороженного на ее внутренней поверхности). Температура КТМ в момент облучения лазером должна составлять $T = 18.3$ К [1]. Ранее, в работе [2], мы обосновали возможность бесконтактной доставки КТМ с помощью ВТСП-носителя в гибридном электромагнитном ускорителе с магнитным рельсом. В настоящей работе представлены результаты исследований по созданию системы, основанной на ускорении магнитного носителя КТМ вдоль сверхпроводящей ленточной ВТСП-направляющей. Реализация этих подходов позволит отказаться от традиционных технологий, работающих с КТМ, укрепленной в центре экспериментальной камеры лазерной установки ИТС на специальном подвесе. Наличие материального подвеса приводит к снижению эффективности сжатия топлива из-за асимметрии облучения, а также исключает проведение экспериментов по сжатию КТМ в частотном режиме.

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: koreshevaer@lebedev.ru.

Особенности подхода. В работе [3] представлены результаты по созданию и тестированию сверхпроводящего ускорителя магнитного снаряда. Ствол ускорителя выполнен из ВТСП материала (сверхпроводящей керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, или сокращенно Y123, $T_c = 93$ K), который смонтирован на медной подложке, охлаждаемой жидким азотом (77 K). До момента начала движения, намагниченный снаряд подвешивается строго в центре цилиндрического сверхпроводящего ствола. В процессе движения контакт снаряда со стенками ствола отсутствует. Для успешного ускорения снаряда применяется система соленоидов с импульсной подачей энергии. Согласно работе [3], вследствие бесконтактного движения, эффективность конверсии магнитной энергии в кинетическую достигает 90% и более. В [3] также приведены результаты экспериментов и расчетов, которые показали, что при реализации этого подхода магнитные снаряды могут быть эффективно ускорены вплоть до скоростей порядка 10^5 м/с.

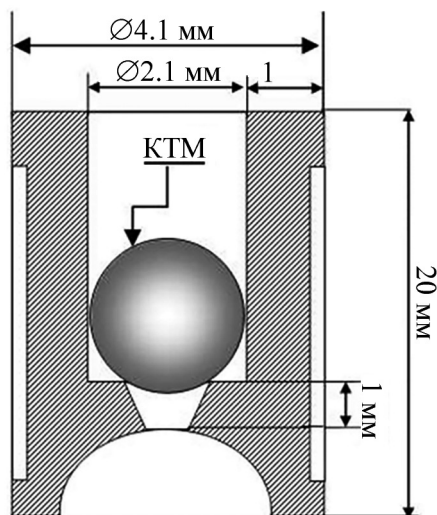


Рис. 1: Носитель КТМ.

Возможно ли данный подход применить при создании системы доставки КТМ? С точки зрения скоростей – безусловно возможно, поскольку необходимые скорости инъекции КТМ в камеру реактора составляют от 200 до 400 м/с. Однако в приложении к задачам ИТС основная проблема здесь заключается в реализации требований на точность (± 20 мкм) и частоту (~ 10 Гц) доставки КТМ в зону облучения. В этом отношении процедура установки магнитного снаряда строго в центре цилиндрического сверхпроводящего ствола [3] при размере КТМ от 2 до 4 мм для обеспечения точности доставки ± 20 мкм и требуемой частоте представляется технологически трудно реализуемой. Поэтому в наших исследованиях, при построении бесконтактного ускорителя

теля КТМ, предлагается отказаться от привычной осевой симметрии (цилиндрический сверхпроводящий ствол в работе [3]) и перейти к асимметричному варианту устройства. В таком ускорителе планируется использовать ВТСП-ленту в качестве направляющего рельса для магнитного носителя. Схема размещения КТМ ($\varnothing = 2$ мм) внутри носителя показана на рис. 1.

Цель проводимых исследований – генерировать различные режимы движения носителя для тестирования условий, которые могут быть использованы при развитии различных систем позиционирования, транспорта и коррекции траектории КТМ на основе эффекта квантовой левитации под действием управляющих сигналов различной природы.

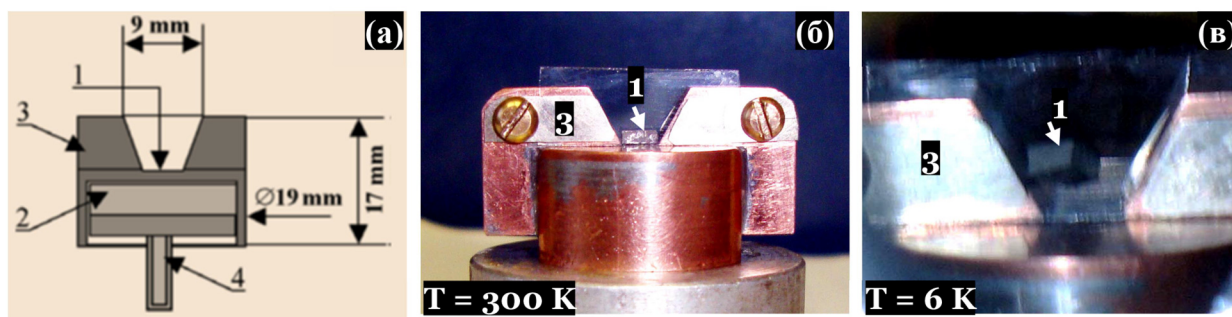


Рис. 2: Левитация магнита над ВТСП подложкой: (а) схема ячейки, расположенной в оптической камере криостата: 1 – область размещения магнита, 2 – область размещения ВТСП подложки, 3 – элементы, выполненные из меди, 4 – стопорный винт; (б) магнит (поз. 1) при 300 К – левитация отсутствует; (в) левитация магнита (поз. 1) при $T < 85$ К.

Так как температура КТМ в момент облучения лазером должна составлять $T = 18.3$ К, необходимо убедиться в эффективности левитации магнитного носителя над ВТСП при этих температурах. В экспериментах (рис. 2) использовался проточный оптический гелиевый криостат типа СБ, модель 1 (производство ООО КристоТрэйд), в оптической камере которого размещалась специализированная ячейка с ВТСП подложкой из сверхпроводящей керамики Y123 (изготовлено в Лаборатории Сверхпроводимости ФИАН [4]) и магнит из Sm (размеры $4.4 \times 1.7 \times 1.7$ мм³, $B = 0.001$ Гс; поставщик ООО Мидора). Эксперименты показали следующее. При охлаждении ВТСП подложки до $T = 85$ К магнит переходит в состояние левитации над подложкой, которая наблюдается при дальнейшем охлаждении от $T = 85$ К до $T = 5.5$ К. Высота подъема составляет 2.0–2.5 мм.

Полученные результаты подтвердили эффективность взаимодействия пары “ВТСП – Магнит” во всём исследуемом диапазоне температур, что дает возможность провести исследования по движению магнита относительно ВТСП-направляющей вблизи температуры кипения жидкого азота (77–80 К). Это значительно дешевле, чем работа при $T \leq 18.3$ К, которая требует использования жидкого гелия. Кроме того, ограниченные размеры оптической камеры криостата (окно наблюдения $\varnothing 25$ мм) не позволяют исследовать направленное движение магнитного носителя в требуемом масштабе (20–50 см).

Макетирование при $T = 77–80$ К. В качестве макета магнитного носителя использовался магнитный шарик, изготовленный на основе неодимового магнита без покрытия (поставщик ООО Мидора). Параметры шарика: диаметр 3 мм, намагниченность 30–46 Гс. ВТСП-направляющая представляет собой открытый параллелепипед, составленный из 3-х ВТСП-лент. В качестве ВТСП использовались ленты типа СуперОкс J-PI-12-20Ag-20Cu (производство ЗАО СуперОкс). Длина каждой ленты 55 мм, ширина 12 мм, толщина 65 мкм. Температура сверхпроводящего перехода $T_c \simeq 92$ К. Эксперименты проводились при $T = 80$ К $< T_c$. Реализовано два способа левитационного движения магнитного носителя: 1) за счет магнитного поля движущегося постоянного магнита, и 2) под действием сил гравитации при различных углах наклона ВТСП-направляющей.

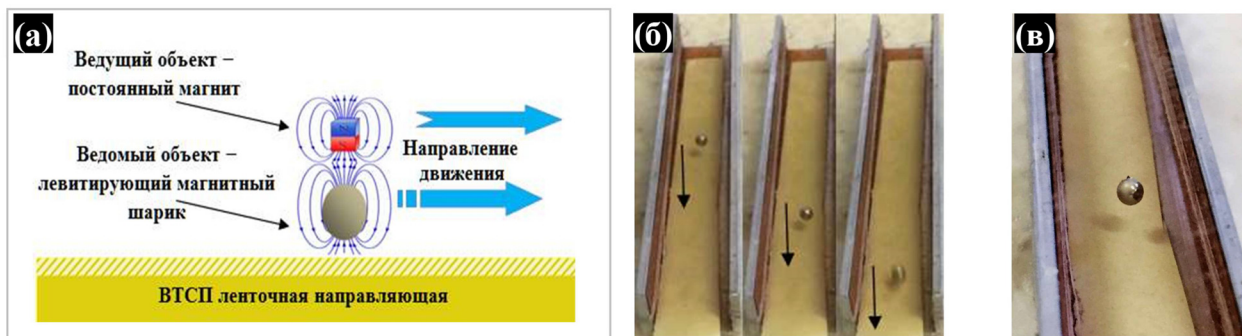


Рис. 3: Движение магнитного шарика под действием поля постоянного магнита, движущегося вдоль ВТСП-направляющей, выполненной в виде открытого параллелепипеда.

Движение магнитного шарика под действием поля постоянного магнита, бегущего вдоль ВТСП-направляющей, дано на рис. 3, при этом схема управления таким движением показана на рис. 3(а), стоп-кадры видеозаписи эксперимента представлены на рис. 3(б), последний кадр (рис. 3(в)) дан с увеличением для более наглядной иллюстра-

ции движения в состоянии левитации. Такой подход позволяет одновременно обеспечить бесконтактный (без трения) транспорт носителя с КТМ, а также гарантирует контроль траектории КТМ в процессе ускорения. Фактически, в этом случае движение носителя будет являться репликой движения ведущего объекта (см. рис. 3(а)).

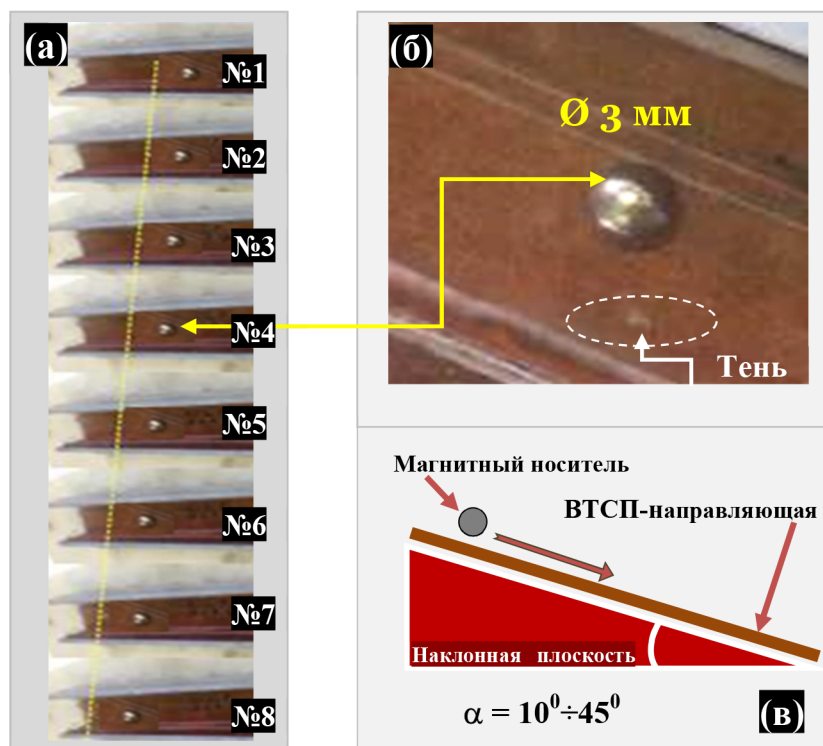


Рис. 4: Гравитационное движение магнитного шарика над VTСП-направляющей ($\alpha = 10^{\circ}$): (а) стоп-кадры ускорения, (б) левитирующий шарик в движении (дано с увеличением), (в) схема эксперимента.

На рис. 4 показано движение магнитного носителя под действием сил гравитации, вариация которых осуществлялась за счет изменения угла наклона VTСП-направляющей ($10^{\circ} \div 45^{\circ}$). При $\alpha = 10^{\circ}$ расстояние в 34 мм шарик прошел за 0.33 с со средней скоростью $v = 10.3$ см/с, что позволяет реализовать инжекционную подачу КТМ в камеру взаимодействия с мощным лазером при температуре стенок камеры 300 К.

Сделаем важное замечание относительно выбора геометрии VTСП-направляющей (рис. 5). Эксперименты показали, что решить поставленную задачу можно для случая открытого параллелепипеда. А вот направляющая в виде треугольного жёлоба не позволяет реализовать свободное движение магнитного носителя (рис. 5(в)).

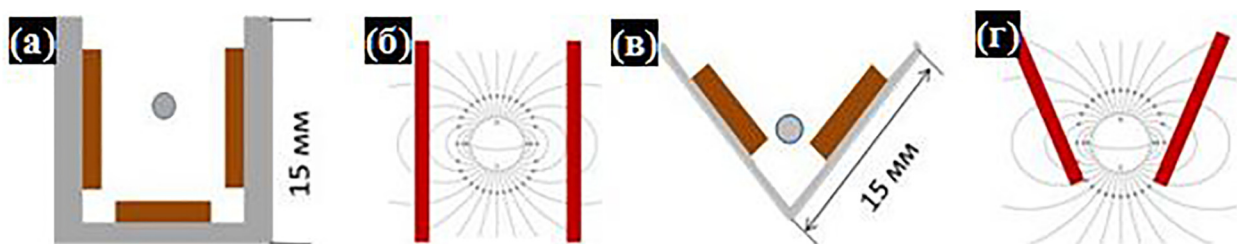


Рис. 5: Геометрия ВТСП-направляющей: ((а), (б)) открытый параллелепипед, ((в), (г)) треугольный жёлоб.

Различие в движении магнитного шарика над ВТСП-направляющей в форме открытого параллелепипеда (свободное движение, рис. 5(а)) и в форме треугольного жёлоба (жёсткая пространственная фиксация, рис. 5(в)), возможно, является следствием асимметрии в распределении линий магнитного поля за счет геометрии самой ВТСП-направляющей (см. рис. 5(б) и 5(г)). Если магнитное поле имеет определенную симметрию, то согласно [5] свободное движение элементов системы “ВТСП – Магнит” относительно друг друга возможно лишь по линиям симметрии поля.

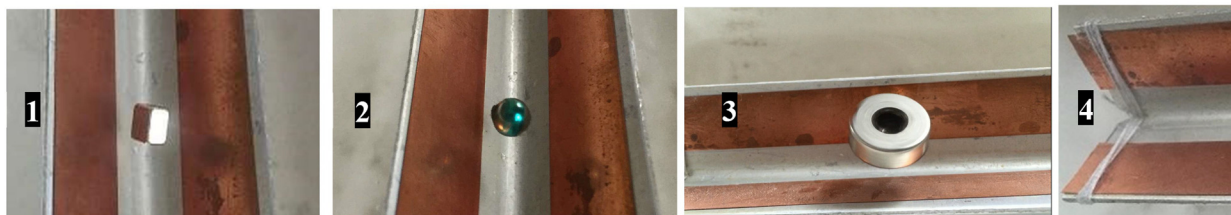


Рис. 6: Левитация постоянных магнитов различной формы над линейной ВТСП-направляющей в виде треугольного жёлоба: 1 – кубик ($5 \times 5 \times 5 \text{ мм}^3$, поле – 0.12 Тл), 2 – шар ($OD = 3 \text{ мм}$, поле – 0.0005 Тл), 3 – диск ($OD = 15 \text{ мм}$, $ID = 6 \text{ мм}$, $h = 3 \text{ мм}$, поле – 0.15 Тл), 4 – крепление ВТСП-лент под углом 90° .

Результаты более детального исследования данного вопроса (см. рис. 6 и 7) с магнитными носителями различной формы (кубик, шар, диск) подтвердили факты, полученные ранее для магнитного шарика – нам не удалось реализовать свободное движение ни кубика, ни диска. Это означает, что использование ВТСП-направляющей в виде треугольного жёлоба, по крайней мере, на данном этапе исследований, не представляется возможным для решения задачи построения системы бесконтактного транспорта КТМ на основе эффекта квантовой левитации магнитного носителя в широком диапазоне изменения его формы.

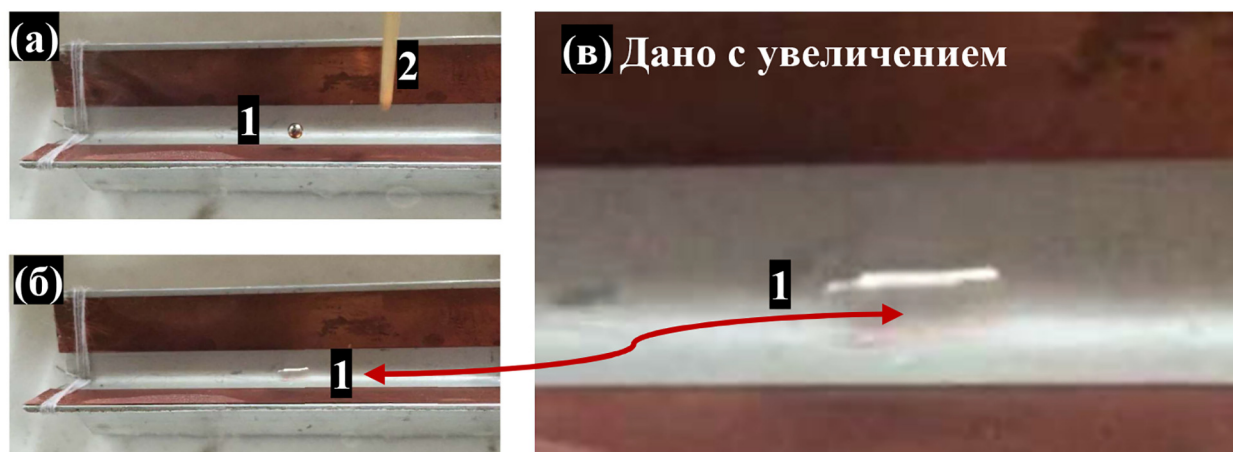


Рис. 7: Колебания магнитного шарика (1) около положения равновесия при воздействии механического толкателя (2): (а) до начала эксперимента, (б) после воздействия толкателя, (в) колебания шарика.

Это подтверждается еще и тем фактом, что попытки внешнего механического воздействия (например, толкателем на магнитный шарик) не стимулируют его движение вдоль линейной направляющей, а вызывают колебания в ограниченной области пространства вблизи точки равновесия. Более сильное механическое воздействие приводит лишь к сдвигу области колебания (рис. 7). Исследования в этом направлении будут продолжены с целью изучения вопроса о жёсткой трехмерной фиксации КТМ в заданной точке пространства, что может быть использовано при создании устройства сборки КТМ, известных как мишени “хольраум” [1].

Заключение. Полученные результаты наглядно демонстрируют возможность использования ВТСП-направляющей в виде открытого параллелепипеда для реализации бесконтактного транспорта КТМ с помощью магнитного носителя. Объединяя результаты [2, 4] с результатами данной работы, можно заключить, что доставка носителя КТМ с помощью левитации – это новое перспективное направление в области создания системы непрерывной подачи топлива в зону термоядерного горения с целью обеспечения требуемой симметрии облучения КТМ. Дополнительные преимущества подхода – это бесконтактный транспорт и, следовательно, отсутствие износа и механического трения, что повышает эффективность, снижает затраты на обслуживание и, в целом, продлевает срок службы системы доставки КТМ при проведении экспериментов по ИТС в частотном режиме.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке МАГАТЭ в рамках контракта № 24154, а также в рамках ГЗ ФИАН и по программе Президиума РАН.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Pathways to energy from inertial fusion: an integrated approach. Report of Coordinated Research Project 2006-2010. IAEA TECDOC No.1704, International Atomic Energy Agency, Vienna (2013); https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1704_web.pdf.
- [2] И. В. Александрова, А. А. Акунец, П. И. Безотосный и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **42**(11), 3 (2015). DOI: 10.3103/S1068335615110019.
- [3] X. W. Wang and J. D. Royston, *Superconductivity and Applications*, eds. H.S. Kwok et al., (Plenum Press, New York, 1990).
- [4] I. V. Aleksandrova, O. M. Ivanenko, V. A. Kalabukhov, et al., J. Russian Laser Research **35**(2), 151 (2014). DOI: 10.1007/s10946-014-9410-y.
- [5] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Course of Theoretical Physics*, Volume 8, Electrodynamics of Continuous Media, Second Edition, Elsevier Ltd., PERGAMON (1984).

Поступила в редакцию 29 марта 2021 г.

После доработки 28 мая 2021 г.

Принята к публикации 31 мая 2021 г.