

УДК 621.039.633

## О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОЙ ДОСТАВКИ КРИОГЕННЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ МИШЕНЕЙ В РЕАКТОР ИТС

И. В. Александрова<sup>1</sup>, А. А. Акунец<sup>1</sup>, П. И. Безотосный<sup>1</sup>, И. С. Блохин<sup>1</sup>,  
С. Ю. Гаврилкин<sup>1</sup>, О. М. Иваненко<sup>1</sup>, Е. Р. Корешева<sup>1,2</sup>, Е. Л. Кошелев<sup>1</sup>,  
К. В. Мицен<sup>1</sup>, Л. В. Панина<sup>3</sup>

*Предложено использовать явление квантовой левитации ВТСП в магнитных полях различной конфигурации для создания системы бесконтактного позиционирования и транспорта криогенных топливных мишеней в фокус мощной лазерной установки или реактора ИТС. Представлены результаты большого цикла экспериментальных исследований с использованием сверхпроводящей керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  и РМГ-направляющих из различных комбинаций постоянных магнитов для построения устройства доставки типа “КТМ-МАГЛЕВ”.*

**Ключевые слова:** криогенная топливная мишень, бесконтактная доставка, высокотемпературные сверхпроводники, направляющая РМГ-система (permanent magnet guideway).

*Введение.* Формирование и доставка криогенных топливных мишеней (КТМ) с высокой частотой является неременным условием построения фабрики мишеней для обеспечения работы реактора инерциального термоядерного синтеза (ИТС) [1].

Особенность процесса доставки заключается в требованиях на частотность доставки (1–10 Гц), точность доставки ( $\pm 20$  мкм) и температурный режим доставки. Криогенная топливная мишень (полая полимерная оболочка со сферическим слоем водородного

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ivaaleks@gmail.ru.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31; e-mail: elena.koresheva@gmail.com.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, д.4; e-mail: L.Panina@plymouth.ac.uk.

топлива на ее внутренней поверхности, рис. 1(а)) должна иметь в момент облучения лазером температуру не выше 18.5 К. При этом температура стенки самой реакторной камеры может достигать значительных величин. Так, например, для камеры реактора SOMBRERO указанная величина составляет 1758 К [2]. Кроме того, на стадии ускорения в инжекторе перегрузки на КТМ могут составлять от 500 г до 1000 г. Именно поэтому ее движение осуществляется в специальном цилиндрическом носителе – саботе (рис. 1(б)), который передает импульс движения на КТМ при ее ускорении до требуемых скоростей инжекции ( $\sim 400$  м/с). Однако при этом выделяется тепло из-за трения сабота о стенку направляющей трубки инжектора. Чтобы исключить этот источник разрушения топливного слоя, было предложено использовать в качестве носителя КТМ сабот из сверхпроводника, что исключает его касание с направляющей трубкой инжектора. Таким образом, создание системы бесконтактного позиционирования и транспорта КТМ представляет собой одну из важнейших задач в общей программе ИТС. Поскольку температура КТМ в момент облучения лазером должна быть  $\sim 18.5$  К, то *сверхпроводники I рода* (низкотемпературные, с температурами перехода в сверхпроводящее состояние  $T_C < 9$  К) не подходят для решения поставленной задачи.

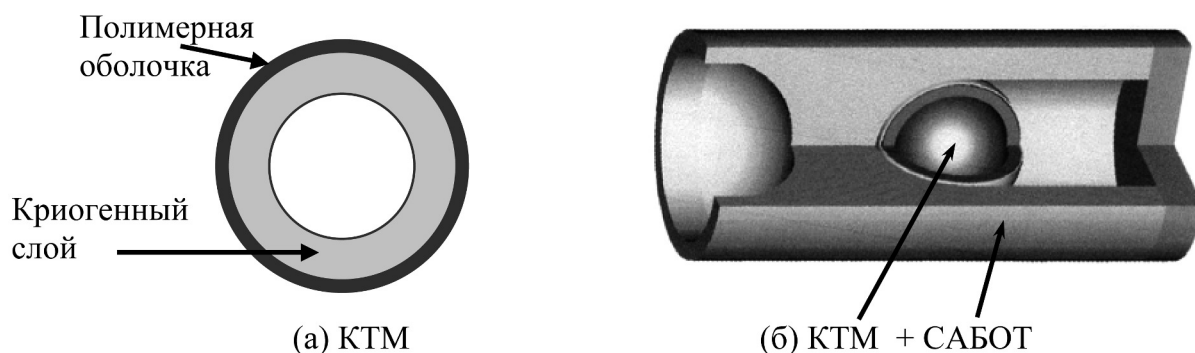


Рис. 1: Криогенная топливная мишень (КТМ) и сборка ансамбля “КТМ + САБОТ”.

Предварительные исследования, проведенные в ФИАН с использованием *сверхпроводников II рода*, т.е. высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), подтвердили плодотворность этого подхода [3]. В данной работе представлены результаты новой серии экспериментов по магнитной левитации (МАГЛЕВ) образцов из сверхпроводящей керамики на основе  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ .

*Технология изготовления таблеток и порошков из ВТСП на основе сверхпроводящей керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ .* Подложки из ВТСП были изготовлены на основе сверхпроводящей керамики в Лаборатории Сверхпроводимости ФИАН. Сверхпроводящая

керамика  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  с температурой сверхпроводящего перехода  $T_C = 91$  К была приготовлена методом твердофазных реакций. Значения нижнего и верхнего критических полей соответственно равны  $\mu_0 H_{C1} = 3$  мТл при  $T = 17$  К и  $\mu_0 H_{C2} > 45$  Тл при 0 К,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума (рис. 2). Значение  $H_{C1}$  определялось по отклонению полевой зависимости магнитного момента от линейной. Величина верхнего критического поля  $H_{C2}$  определялась по формуле Вертхамера–Хоенберга [4].

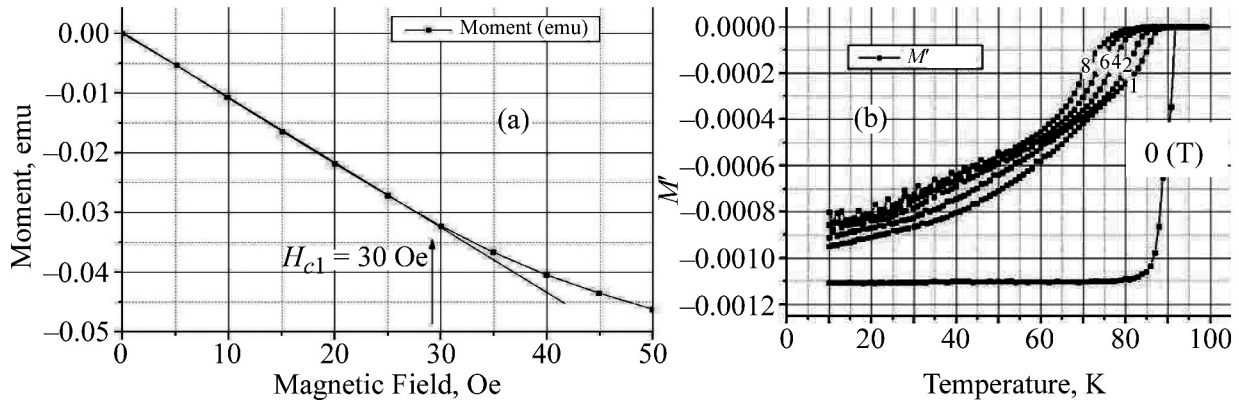


Рис. 2: Параметры сверхпроводящей керамики (ФИАН): (а) магнитный момент образца в зависимости от магнитного поля при температуре  $T = 17$  К; (б) магнитная восприимчивость в зависимости от температуры для различных значений внешнего магнитного поля  $\mu_0 H = 0, 1, 2, 4, 6, 8$  Тл.

Измерения электрических и магнитных свойств ВТСП-образцов проводились с помощью имеющегося в ФИАН многофункционального автоматизированного измерительного комплекса РРМС-9 (фирма Quantum Design). В комплексе предусмотрены опции, которые позволяют измерять магнитный момент как в статическом, так и в динамическом режимах. Точность измерений магнитного момента  $2.5 \cdot 10^{-5}$  emu. Максимальное значение магнитного поля достигает 9 Тл при однородности поля в области образца не хуже 0.01%. Интервал температур, доступных при измерениях, составляет 0.35–400 К при точности поддержания температуры не хуже 0.01 К.

Сверхпроводящие таблетки из  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  керамики (везде далее Y123-таблетки) использовались в качестве носителей для полимерных (СН) оболочек. Таблетки моделировали поведение сабота в магнитных полях различной конфигурации. Для получения сверхпроводящего порошка уже приготовленную Y123-таблетку размалывали, растирали и отжигали в атмосфере кислорода при 440 °С. После окончания этой процедуры из печи вынимали порошок, который затем использовался в опытах по левитации для

создания сверхпроводящего Y123-покрытия на внешней поверхности СН-оболочек.

*Экспериментальное моделирование и обсуждение результатов.* Цель проводимых исследований – генерировать различные режимы левитации ВТСП-образцов для тестирования условий, которые могут быть использованы в системах позиционирования и транспорта КТМ на основе эффекта квантовой левитации. Отметим, что ВТСП-материалы позволяют работать в двух направлениях: непрямая доставка, когда КТМ предварительно размещается внутри сабота, и прямая доставка, когда КТМ движется самостоятельно без какого-либо носителя.

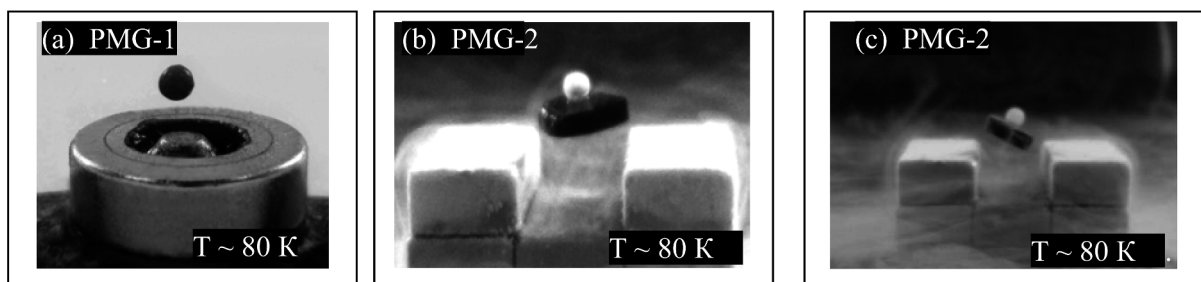


Рис. 3: Стабилизация положения ВТСП-объекта в заданной точке пространства: (а) СН-оболочка с Y123-покрытием; ((б), (в)) СН-оболочка ( $\varnothing \sim 2$  мм), размещенная на Y123-подложке.

На рис. 3(а) показана свободная левитация СН-оболочки без использования какого-либо носителя. Для ее реализации на внешнюю поверхность оболочки было нанесено сверхпроводящее покрытие, так называемый Y123-слой. Оно представляет собой композит из вязкого полимера со встроенными микрочастицами из сверхпроводящей керамики размером от 10 до 50 мкм [3].

Реализация непрямой доставки предполагает разработку специального носителя мишени – сверхпроводящего сабота. Результаты моделирующих экспериментов представлены на рис. 3((б), (в)), которые демонстрируют стабилизацию положения ВТСП-объекта в виде СН-оболочки, размещенной на сверхпроводящей подложке. Диаметр оболочки  $\varnothing \sim 2$  мм соответствует базовой мишени класса HiPER (High Power laser Energy Research) [5], предназначенной для проведения экспериментов на первой в мире частотной лазерной установке ( $E_l = 200$  кДж), строящейся сейчас в Европе. Ее работа потребует формирования и доставки КТМ ударного поджига с частотой  $\nu \geq 1$  Гц. Отметим, что первые исследования в этом направлении выполнены в работе [3], в которой в широком диапазоне температур ( $T = 6 - 80$  К) детально изучена стабильность левитации Y123-образцов различной геометрии. При этом схожие результаты были получены

во всем диапазоне температур от 6 до 80 К, что дает возможность проведения экспериментов по движению сабота вблизи 80 К, т.е. в условиях азотной (температура кипения жидкого азота  $T_{Ne} = 77$  К), а не гелиевой ( $T_{He} = 4.2$  К) криогеники, что значительно дешевле.

В настоящей работе мы переходим к изучению транспорта левитирующих образцов, моделирующих движение сабота: (а) в виде свободной Y123-подложки, и (б) СН-оболочки, размещенной на Y123-подложке (Y123 + СН). Движение осуществлялось в магнитных полях различной конфигурации, формируемых с помощью постоянных магнитов (табл. 1), задающих направление движения Y123-образцов (в литературе принято обозначение – permanent magnet guideway (PMG) системы). В наших экспериментах использовались неодимовые магниты без покрытия с аксиальным намагничиванием (Фирма МИДОРА). В качестве магнитопроводов использовались вставки из магнитомягкого ферромагнетика.

Т а б л и ц а 1

*Магниты, использованные в экспериментах: неодимовые магниты без покрытия с аксиальным намагничиванием (поставки через фирму МИДОРА)*

№	Форма и размеры магнитов*	В (Тл)		Вес (г)	Применение (экспер.)
		min	max		
1	Диск (1 шт): $OD = 15$ мм, $d = 5$ мм, $ID = 6$ мм, $h = 3$ мм	0.20	0.25	6.6	PMG-1
2	Параллелепипед (4 шт): $l = 10$ мм, $d = 5$ мм, $s = 10$ мм	0.28	0.30	7.5	PMG-2
3	Параллелепипед (3 шт): $l = 120$ мм, $d = 4$ мм, $s = 18$ мм	0.28	0.30	28	PMG-3
4	Кольцо (1 шт): $OD = 100$ мм, $ID = 50$ мм, $d = 5$ мм	0.13	0.25	218	PMG-4

\* **Примечание:** сплав NdFeB (спеченный),  $d$  – толщина,  $h$  – глубина,  $l$  – длина,  $s$  – ширина.

Измерения поля PMG-систем проводилось с помощью магнитометра, изготовленного в ФИАН на основе датчика Холла типа ДХК-0.5А с чувствительностью 280 мВ/Тл. Диапазон измеряемого поля  $\pm 1$  Тл, погрешность измерений  $\pm 0.005$  Тл, точность положения чувствительного элемента 0.1 мм.

Проведенная серия экспериментов включала несколько этапов по разработке РМГ-систем для стабилизации движения в интересующих нас случаях: (1) устойчивая (стабильная) левитация Y123-образца в заданной точке пространства, как частный случай движения, когда его скорость  $v = 0$ ; (2) линейное движение Y123-образца в заданной области пространства; (3) круговое движение Y123-образца в заданной области пространства.

Реализация устойчивой левитации Y123-образцов в заданной точке пространства (см., напр., рис. 3) обусловлена определенными свойствами ВТСП-материалов, относящимися к *сверхпроводникам II рода*, которые демонстрируют неполный эффект Мейснера с частичным вытеснением поля. Поле выталкивается полностью лишь тогда, когда внешнее магнитное поле не превосходит нижнего критического значения, которое в нашем случае для сверхпроводящей керамики составляет 3 мТл.

При бóльших полях магнитный поток начинает проникать внутрь образца, который, однако, продолжает сохранять сверхпроводящие свойства, пока поле не достигнет верхнего критического значения  $H_{C2}$ . Таким образом, при повышении напряженности магнитного поля выше  $H_{C1}$  сверхпроводник II рода “находит возможность” впустить поле внутрь, как бы “вморозить” его (пиннинг эффект), одновременно сохраняя сверхпроводимость. Магниты, использованные в наших экспериментах, создавали поля  $\mu_0 H > 0.13 \text{ Тл} > \mu_0 H_{C1}$  (см. табл. 1), т.е. в Y123-образцах осуществлялся захват магнитного потока и стабилизация их положения, причем достигаемый эффект не зависел от исходного положения образца (сравните рис. 3(б) и 3(в)).

Переход от стабильного подвеса Y123-образца в заданной точке пространства к его движению осуществляется за счет изменения конфигурации РМГ-системы. На рис. 4(а) показано линейное движение СН-оболочки ( $\varnothing \sim 2 \text{ мм}$ ), размещенной на Y123-подложке, моделирующей сабот. В этом случае РМГ состоит из 4-х стандартных прямоугольных магнитов ( $B \sim 0.4 \text{ Тл}$ , габариты  $10 \times 9 \times 5 \text{ мм}^3$ ) с ферромагнитной вставкой, причем вся конфигурация размещена на пластине из магнитомягкого железа (электротехническая сталь толщиной 0.5 мм). Вставка выполнена в виде шпильки типа DIN 976-1 с метрической полной резьбой (формат М6,  $\varnothing = 6 \text{ мм}$ , длина  $l = 30 \text{ мм}$ , шаг и глубина резьбы 1 мм). Материал шпильки – электротехническая сталь со следующими характеристиками: начальная относительная проницаемость  $\mu_{in} = 600$ , максимальная  $\mu_{max} = 15000$ , коэрцитивная сила  $H = 0.35 \text{ Э}$ .

Конечно, КТМ может находиться внутри сабота (рис. 1(б)) более значительных размеров, чем ее собственные. Для моделирования этого случая был использован массив-

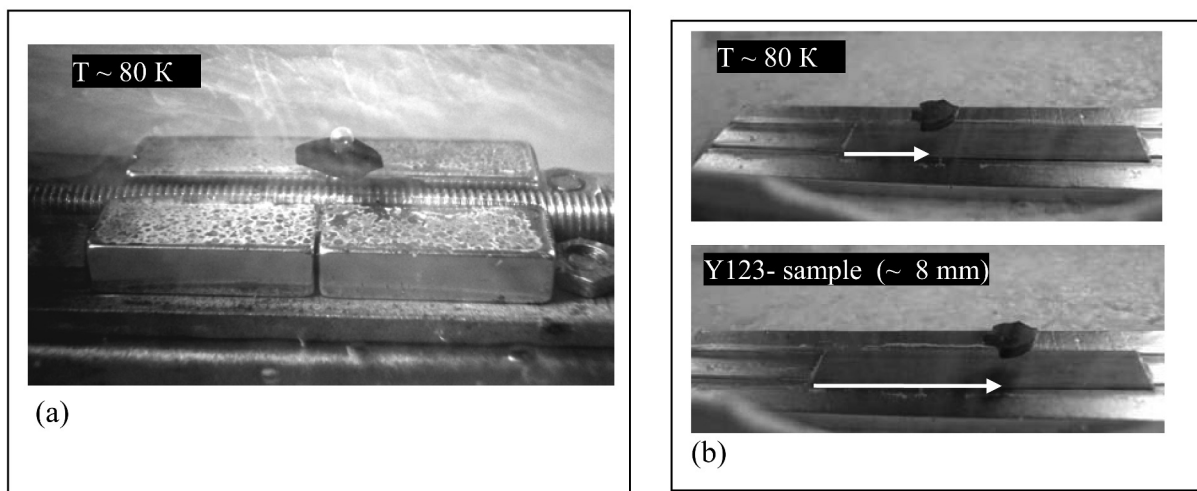


Рис. 4: Простейшие PMG-системы, позволяющие реализовать движение сверхпроводящих ВТСП-образцов: (а) система PMG-2 из 4-х постоянных магнитов с винтовой ферромагнитной вставкой, размещенных на пластине из магнитомягкого железа; (б) система PMG-3 (схема на рис. 5(б)).

ный Y123-образец с габаритным линейным размером ~8 мм (рис. 4(б)).

Простое линейное движение не единственный способ транспорта сверхпроводящих образцов, который представляет интерес для построения устройства доставки типа “МАГЛЕВ”.

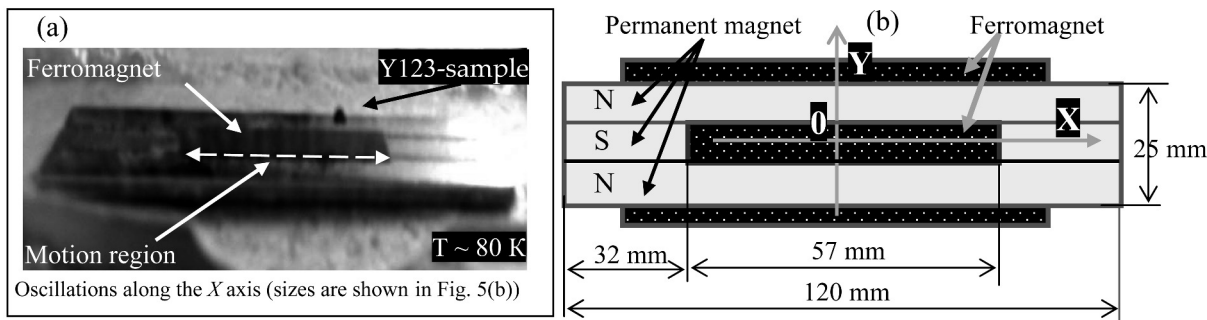


Рис. 5: Образец из ВТСП (а) совершает колебания над ферромагнитной пластиной, входящей в систему PMG-3 (конфигурация системы дана на рис. 5(б), вертикальная ось Z нормальна плоскости XY).

На рис. 5(а) показано линейное движение Y123-образца ( $\varnothing \sim 2$  мм), повторяющееся в ограниченном пространстве (т. н. сверхпроводящий маятник). Композиция направляющей системы PMG-3 дана на рис. 5(б). Движение реализуется как колебания

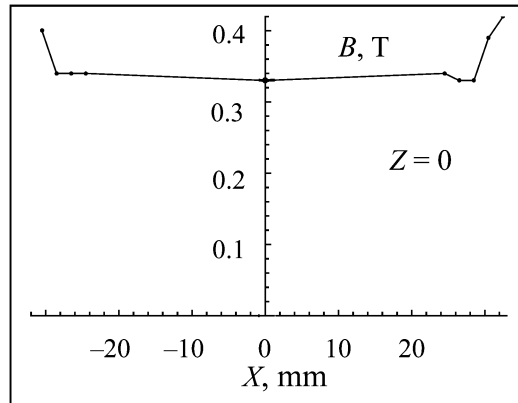


Рис. 6: Распределение магнитного поля для системы РМГ-3 (сверхпроводящий маятник).

У123-маятника в магнитной ловушке, ограничивающей его движение. Это означает, что при уменьшении линейных размеров РМГ-системы можно ограничить движение У123-образца в так называемом “тугом пространстве” (tight space), что крайне перспективно для коррекции траектории КТМ при построении инжектора с заданными характеристиками точности. Распределение магнитного поля для системы РМГ-3 показано на рис. 6. Распределение поля по оси  $Z$  очевидно из построения системы РМГ-3 (рис. 5): вертикальная компонента поля возрастает по мере приближения к плоскости  $XY$  (место расположения постоянных магнитов) и при  $Z = 0$  достигает значения 0.34 Тл, которое остается постоянным вдоль оси  $X$  (рис. 6).

Энергия взаимодействия внешнего магнитного поля и сверхпроводящего образца, который приобретает в поле магнитный момент  $M$ , определяется как  $U = -\mu_0 M H$ . Сверхпроводник в поле можно характеризовать диамагнитной восприимчивостью  $M = \chi H$ , если градиент изменения поля на размере образца несущественен. Тогда сила, действующая на сверхпроводник, имеет вид  $F = -\text{grad } u$ . Если магнитное поле уменьшается при удалении от полюсов, то есть производная квадрата поля является отрицательной и убывает по абсолютной величине, это приводит к отталкиванию сверхпроводника от поверхности магнита. Так как сила отталкивания убывает с увеличением расстояния от плоскости  $Z = 0$ , то при наличии силы тяжести сверхпроводящий образец зависнет над поверхностью магнита на некоторой высоте  $h$ . Это произойдет при выполнении условия  $F_Z = mg$ . В нашем случае для системы РМГ-3 высота левитации составила  $h = 3$  мм. Напомним, что по оси  $X$  поле практически постоянно, т. е. по  $X$  получаем вообще безразличное равновесие. Область колебания вдоль  $X$  показана на рис. 5(а) и



составляет  $\sim 50$  мм (см. рис. 5(б) и 6). Квадрат поля имеет минимум по оси  $Y$ , что говорит об отсутствии сил в горизонтальном направлении и устойчивости колебательного движения, так как  $\partial^2 U / \partial Y^2 > 0$ .

Чтобы реализовать круговое движение сверхпроводящего ВТСП-образца в заданной области пространства, необходимо выполнить построение PMG-системы по принципам, изложенным выше для линейного колебательного движения. Прежде всего, необходимо иметь область постоянного поля (для кругового движения – это окружность), поле должно убывать по мере удаления от плоскости расположения PMG-системы, а в распределении квадрата поля по радиусу  $R$  должен быть минимум, чтобы исключить уход сверхпроводящего образца с заданной орбиты. Другими словами, это означает, что мы должны замкнуть линейную PMG-систему, чтобы перейти к круговой организации движения интересующих нас ВТСП-объектов (рис. 7 и 8).

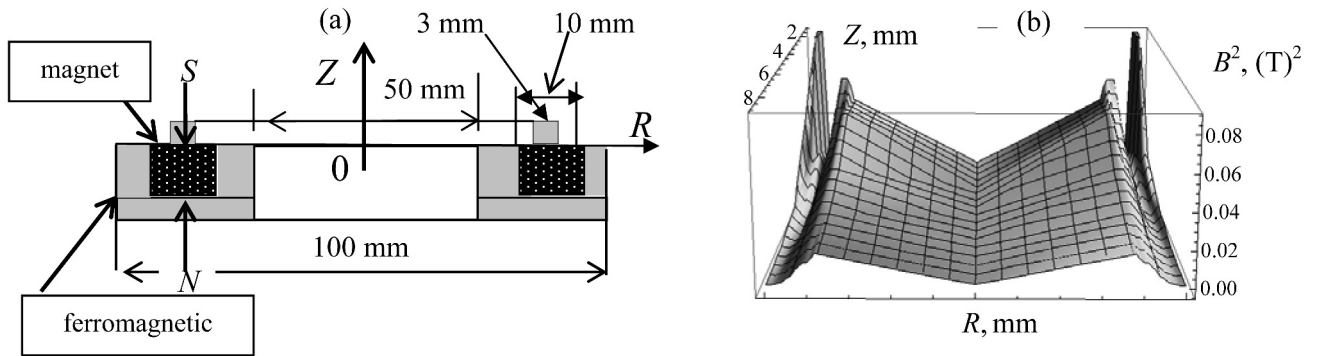


Рис. 7: Конфигурация системы PMG-4, обеспечивающая устойчивое круговое движение Y123-образца относительно оси  $Z$  (а), и (б) – распределение квадрата магнитного поля для PMG-4.

На рис. 7(а) дана конфигурация и размеры системы PMG-4, обеспечивающей устойчивое круговое движение Y123-образца относительно оси  $Z$ . Распределение квадрата поля показано на рис. 7(б), а рис. 8 демонстрирует стоп-кадры видеозаписи эксперимента по левитации Y123-образца в системе PMG-4.

Основные выводы, которые можно сделать на данном этапе исследований, следующие:

– Стабильная левитация ВТСП-образцов наблюдается при реализации всех видов движения (подвес сверхпроводника в заданной точке пространства, циклические перемещения сверхпроводника – линейное и круговое). Это полностью соответствует требованиям по созданию системы бесконтактного позиционирования и транспорта КТМ в

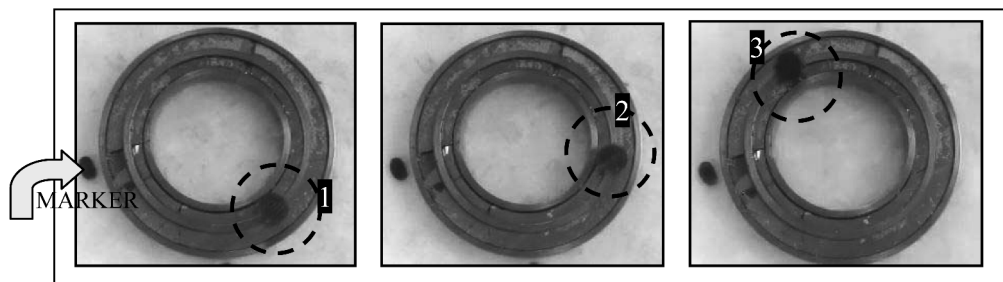


Рис. 8: Стоп-кадры при движении Y123-образца относительно оси Z в системе PMG-4. Маркер используется как точка отсчета при фиксации положения Y123-образца в моменты времени  $t_1, t_2, t_3$ .

фокус мощной лазерной установки или реактора ИТС.

– При создании системы доставки типа “КТМ-МАГЛЕВ” ВТСП-материалы могут быть использованы как в дизайне покрытия КТМ, так и в дизайне сабота, как носителя КТМ.

– Подчеркнем, что требуемая сила левитации может быть достигнута при сравнительно простой конфигурации PMG-системы, что значительно упрощает любые конструкторские разработки.

– Возможно построение ускорителя КТМ в том виде, когда направляющая трубка электромагнитного инжектора, изготовленная из ВТСП, стационарна, а намагниченное тело (КТМ+ПОКРЫТИЕ или КТМ+САБОТ) движется вдоль направляющей инжектора.

Важное замечание следует сделать относительно влияния микроструктуры сверхпроводника на оптимизацию проводимых исследований. Обычные ВТСП-материалы, получаемые методом твердофазного синтеза, представляют собой керамику, в которой микроскопические кристаллиты ВТСП-фазы разориентированы в пространстве друг относительно друга и слабо связаны между собой (“сверхпроводящее стекло”). Возможности левитационных свойств таких материалов могут быть ограничены. Одним из возможных путей получения ВТСП с заданной микроструктурой – это кристаллизация расплава, так как в нем скорость диффузии компонентов гораздо выше, чем в твердом теле. Кроме того, из-за относительно малой вязкости расплава возможна “подстройка” формирующихся анизотропных кристаллитов друг относительно друга, как совпадающих частей мозаики. Так, например, сложная микроструктура ВТСП-образцов наблюдалась в работе [6], где было обнаружено много интересных и совсем не

случайных особенностей, связанных с макро-, мезо- и микроуровнями структурирования материала. Это создает предпосылки для формирования оптимальной микроструктуры ВТСП-материала именно для учета специфики конкретной поставленной задачи, в нашем случае – построения устройства доставки типа “КТМ-МАГЛЕВ” для непрерывного обеспечения криогенным водородным топливом экспериментов по программе ИТС.

*Заключение.* В ФИАН начато изучение перспектив применения явления квантовой левитации ВТСП как метода бесконтактного позиционирования и транспорта КТМ при их доставке в фокус мощных лазерных установок или реактора ИТС. На данном этапе исследований в качестве ВТСП использовалась сверхпроводящая керамика на основе  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  с температурой сверхпроводящего перехода  $T_C = 91$  К и значением верхнего критического поля  $H_{C2} > 45$  Тл. В работе продемонстрирована возможность не только осуществить стабильную левитацию различных ВТСП-образцов, но и возможность их линейного и циклического движения. Полученные результаты будут использованы в программе ФИАН по разработке системы бесконтактной доставки КТМ с использованием линейного или циклического ускорителя.

Финансовая поддержка работы осуществлялась в рамках контракта РФФИ № 15–02–02497, а также в рамках Государственного контракта по организации научной деятельности.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] I. V. Aleksandrova et al., *Plasma & Fusion Research* **8** (2), 3404052 (2013).
- [2] D. T. Goodin et al., *Nuclear Fusion* **44**, S254 (2004).
- [3] I. V. Aleksandrova et al., *J. Russian Laser Research* **35** (2), 15 (2014).
- [4] N. R. Werthhamer, E. Helfand, and P. C. Hohenberg, *Phys. Rev.* **147**, 295 (1966).
- [5] I. V. Aleksandrova et al., *Proc. SPIE* **8080**, 80802M (2011).
- [6] Е.А. Гудилин, Н. Н. Олейников, *Сверхпроводимость: исследования и разработки* **5-6**, 81 (1995).

Поступила в редакцию 9 июня 2015 г.