

## Равновесие системы сверхпроводящих колец в однородном поле силы тяжести

© А.М. Бишаев,<sup>1</sup> А.А. Буш,<sup>1</sup> М.Б. Гавриков,<sup>2</sup> И.С. Гордеев,<sup>1</sup> А.И. Денисюк,<sup>1</sup>  
 К.Е. Каменцев,<sup>1</sup> М.В. Козинцева,<sup>1</sup> В.В. Савельев,<sup>2</sup> А.С. Сигов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики,  
 119454 Москва, Россия  
 e-mail: kozintseva@mirea.ru

<sup>2</sup> Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,  
 125047 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 3 мая 2012 г.)

Для создания плазменной ловушки с левитирующими магнитными катушками в приближении тонких колец получено выражение для потенциальной энергии системы из нескольких сверхпроводящих колец (причем одно из колец закреплено), захвативших заданные потоки, в однородном поле силы тяжести как функции координат свободного кольца (либо свободных колец). Вычисления, выполненные в системе Mathcad, показали, что при определенных значениях параметров существует локальный минимум потенциальной энергии такой системы. Экспериментально осуществлена устойчивая левитация сверхпроводящего кольца в поле другого сверхпроводящего кольца в положении, соответствующем расчетному, что позволило сделать вывод о возможности создания магнитной ловушки-галатеи на основе левитирующего квадруполья.

### Введение

В исследованных до настоящего времени ловушках-галатеях [1–4] катушки, погруженные в плазму (так называемые „миксины“), конструктивно закреплены с помощью державок. В термоядерном реакторе миксины должны левитировать. Предложенные и осуществленные на сегодня в США [5] и Японии [6] левитирующие системы формируют простейшую конфигурацию магнитного поля: поле диполя. Следующая по сложности система — квадруполь. Переход от левитирующего диполя к левитирующему квадруполью несет в себе главное принципиальное отличие: надо добиться левитации двух взаимодействующих катушек с током [7].

### 1. Потенциальная энергия системы сверхпроводящих колец, захвативших заданные потоки, в однородном поле силы тяжести

В обоснование возможности осуществления левитирующего квадруполья при использовании сверхпроводников теоретически была рассмотрена задача о равновесии системы сверхпроводящих колец в однородном поле силы тяжести. Предполагалось, что радиус сечения каждого из колец ( $a_k$ ) много меньше среднего радиуса соответствующего кольца ( $R_k$ ).

Рассмотрим систему из двух или трех коаксиальных колец, имеющих общую вертикальную ось и лежащих в параллельных горизонтальных плоскостях. Рис. 1 поясняет расположение сверхпроводящих колец. Кольца нумеруются сверху вниз. Только одно из колец закрепле-

но. Координаты отсчитываются от этого закрепленного кольца.

Считая, что потоки, захваченные сверхпроводящими кольцами, сохраняются, можем записать [8]

$$\sum_k L_{ik} J_k = \Phi_i = \text{const}, \quad L_{ik} = L_{ki}, \quad (1)$$

где  $\Phi_i$  — магнитный поток, захваченный  $i$ -м кольцом,  $L_{ik}$  — коэффициенты индукции,  $J_k$  — токи в кольцах. Решив систему (1) относительно токов, получаем для них выражения как функции координаты  $x$  свободного кольца  $J_k(x)$  (либо — координат свободных колец).

Для двух сверхпроводящих колец, захвативших потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  соответственно, причем первое кольцо закреплено, а второе — свободно, выражение для потенциальной энергии  $U(x)$  данной конфигурации колец как функция координаты  $x$  свободного кольца (приняв,

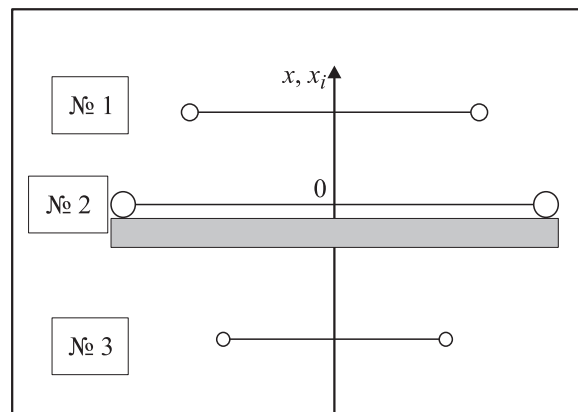
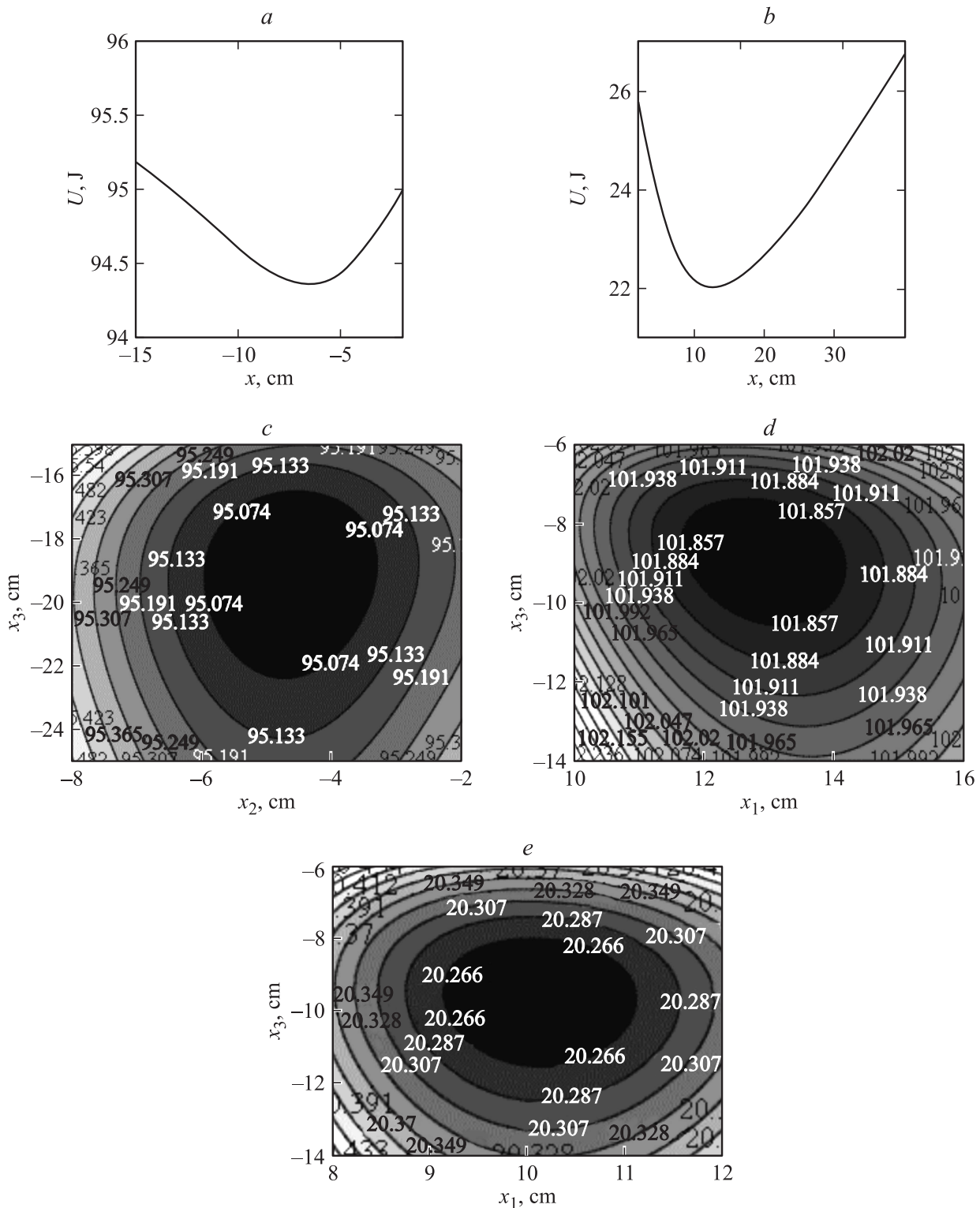


Рис. 1. Расположение сверхпроводящих колец.



**Рис. 2.** Зависимости потенциальной энергии системы двух (a, b) и трех сверхпроводящих колец (c-e) в поле силы тяжести от координат свободных колец: a —  $R_1 = 15$ ,  $R_2 = 8$  см,  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 1$  см,  $\Phi_1 = 10^{-2}$ ,  $\Phi_2 = 1.5 \cdot 10^{-3}$  Вб,  $m_2 = 1.5$  кг, верхнее кольцо закреплено; b —  $R_1 = 20$ ,  $R_2 = 25$  см,  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 1$  см,  $\Phi_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\Phi_2 = 1 \cdot 10^{-3}$  Вб,  $m_1 = 2.5$  кг; нижнее кольцо закреплено; c —  $R_1 = 15$ ,  $R_2 = 8$ ,  $R_3 = 15$  см,  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 1$ ,  $a_3 = 1$  см,  $\Phi_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ ,  $\Phi_2 = 1.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\Phi_3 = 1 \cdot 10^{-3}$  Вб,  $m_2 = 0.2$ ,  $m_3 = 0.03$  кг; верхнее кольцо (№ 1) закреплено; d —  $R_1 = 8$ ,  $R_2 = 15$ ,  $R_3 = 8$  см,  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 1$ ,  $a_3 = 1$  см,  $\Phi_1 = -1 \cdot 10^{-5}$ ,  $\Phi_2 = 10^{-2}$ ,  $\Phi_3 = 1.5 \cdot 10^{-3}$  Вб,  $m_1 = 1.2$ ,  $m_3 = 0.04$  кг; среднее кольцо (№ 2) закреплено; e —  $R_1 = 20$ ,  $R_2 = 25$ ,  $R_3 = 15$  см,  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 1$ ,  $a_3 = 1$  см,  $\Phi_1 = -5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\Phi_2 = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $\Phi_3 = -1 \cdot 10^{-3}$  Вб,  $m_1 = 2.5$ ,  $m_3 = 0.1$  кг; среднее кольцо (№ 2) закреплено.

что ось  $x$  направлена вверх) при наличии однородного поля гравитации примет вид [8]

$$U(x) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \Phi_k J_k(x) + m_2 g x, \quad (2)$$

где  $m_2$  — масса второго кольца.

Для трех сверхпроводящих колец, захвативших потоки  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  соответственно, причем первое кольцо закреплено, а второе и третье — свободны, формула для потенциальной энергии  $U(x_2, x_3)$  запишется в виде

$$U(x_2, x_3) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 \Phi_k J_k(x_2, x_3) + m_2 g x_2 + m_3 g x_3, \quad (3)$$

где  $m_2$  и  $m_3$  — масса второго и третьего кольца, а  $x_2$ ,  $x_3$  — их координаты соответственно.

Аналогично запишутся выражения для других вариантов конфигураций из двух или трех сверхпроводящих колец, захвативших заданные магнитные потоки.

Коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции колец рассчитывались в приближении тонких колец ( $a_k \ll R_k$ ) по следующим формулам [8,9]:

$$L_{ii} = \mu_0 R_i \left[ \ln \left( \frac{8R_i}{a_i} \right) - 2 \right], \quad (4)$$

$$L_{ik} = \frac{2\mu_0}{h(x_{ik})} \sqrt{R_i R_k} \left[ \left( 1 - \frac{1}{2} h^2(x_{ik}) \right) K(h(x_{ik})) - E(h(x_{ik})) \right], \quad i \neq k, \quad (5)$$

$$h_{ik} = \left[ \frac{4R_i R_k}{(R_i + R_k)^2 + x_{ik}^2} \right]^{1/2}, \quad x_{ik} = |x_i - x_k|,$$

где  $K$ ,  $E$  — полные эллиптические интегралы первого и второго рода соответственно, а координата  $x_1$  неподвижного кольца равна нулю.

Поскольку потенциальная энергия  $U$  данной конфигурации зависит от многих параметров, то основным вопросом в предварительных исследованиях был вопрос о том, существует ли при каких-то значениях этих параметров локальный минимум потенциальной энергии.

Вычисления, выполненные в системе Mathcad на нескольких конкретных примерах для интересующих нас случаев: 1) система двух колец, одно из которых закреплено, а второе свободно (для совпадающих и противоположных по направлению токов в них), 2) система трех колец, одно из которых закреплено, а два других свободны (для различных направлений токов в кольцах), показали, что во всех рассмотренных случаях существует равновесное состояние, устойчивое по отношению к вертикальным смещениям. На рис. 2 приводятся имеющие локальный минимум зависимости потенциальной энергии системы двух и трех сверхпроводящих колец от координат свободных колец, иллюстрирующие сказанное.

В реальном эксперименте важно обеспечить устойчивость левитирующего состояния кольца по отношению к его смещениям в горизонтальной плоскости и к его повороту вокруг произвольной горизонтальной оси. Поэтому в дополнение к расчетам, выполненным по формулам (1)–(5), необходимо проведение экспериментальных исследований найденных по ним равновесных состояний на устойчивость указанного типа.

## 2. Изготовление экспериментальных образцов

Предварительные эксперименты по левитации сверхпроводящих колец, изготовленных по керамической технологии из ВТСП фазы Y-123, в специально созданном поддерживающем магнитном поле продемонстрировали возможность осуществления одновременной устойчивой левитации двух сверхпроводящих колец [7]. Однако данные кольца из-за наличия слабых связей на межзерновых границах имеют низкие плотности критических токов ( $j_c < 10^6 \text{ A/m}^2$ ) [10–12].

Образцы с высокими  $j_c$  были получены из предварительно синтезированного порошка ВТСП фазы

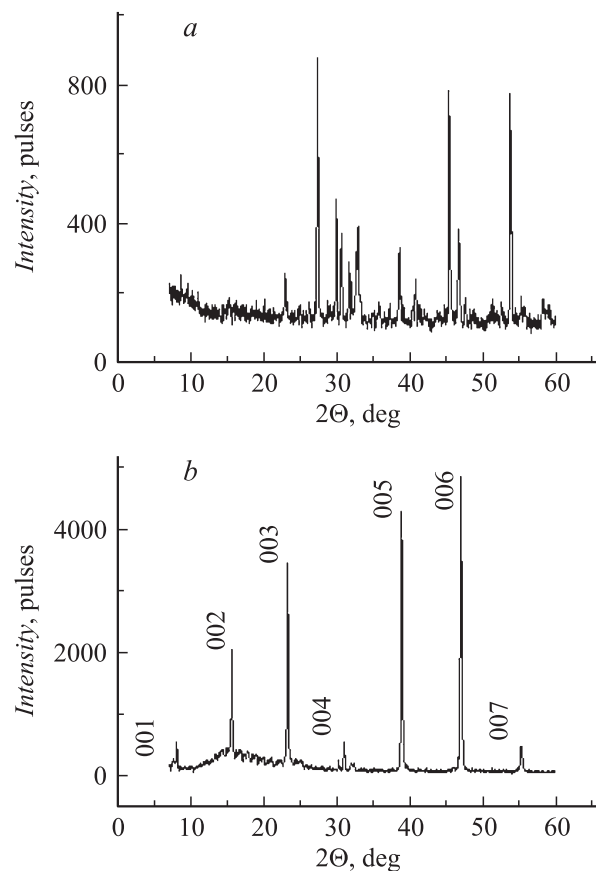


Рис. 3. Дифрактограммы, снятые в геометрии  $\Theta$ – $2\Theta$ , с измельченного в порошок образца с добавлением порошка кристаллов германия в качестве внутреннего эталона (а) и с торцевой поверхности кольцеобразного ВТСП-образца (б).

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  с использованием так называемого метода MTG (melt textured growth) [11]. Он включает в себя частичное плавление образца ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y \rightarrow \text{Y}_2\text{BaCuO}_5 + \text{жидкость}$  при  $T = 1050^\circ\text{C}$ ) и медленное охлаждение образца в температурном градиенте ( $50 \text{ deg/cm}$ ) с формированием образца ВТСП фазы  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ , имеющего упорядоченную ориентацию кристаллитов.

Для определения фазового состава и степени текстурирования полученных образцов были сняты их рентгенограммы на автоматизированном рентгеновском дифрактометре ДРОН ( $\lambda\text{CuK}\alpha$ -излучение). Дифрактограмма измельченного в порошок образца, показанная на рис. 3, а, указывает на то, что его основной фазой является ВТСП фаза  $\text{YBa}_2\text{Cu}_2\text{O}_y$ , а примесной фазой — так называемая „зеленая“ фаза  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ . В результате индирования рефлексов фазы  $\text{YBa}_2\text{Cu}_2\text{O}_y$  найдено, что она имеет ромбическую симметрию с размерами элементарной ячейки, равными  $a = 3.890(2) \text{ \AA}$ ,  $b = 3.821(2) \text{ \AA}$ ,  $c = 11.674(5) \text{ \AA}$ . Эти результаты с учетом данных о зависимости  $c(y)$  [13,14] позволяют определить кислородный индекс ВТСП фазы в изготовленных образцах:  $y = 6.9$ .

На дифрактограмме, снятой в геометрии  $\Theta-2\Theta$  с торцевой поверхности кольцеобразного образца и показанный на рис. 3, б, проявляются только осевые рефлексы типа (001). Такая особенность дифрактограммы свидетельствует об упорядочении кристаллитов образца таким образом, что их длинная кристаллографическая ось  $c$  ( $11.67 \text{ \AA}$ ) ориентирована перпендикулярно базисной поверхности образца.

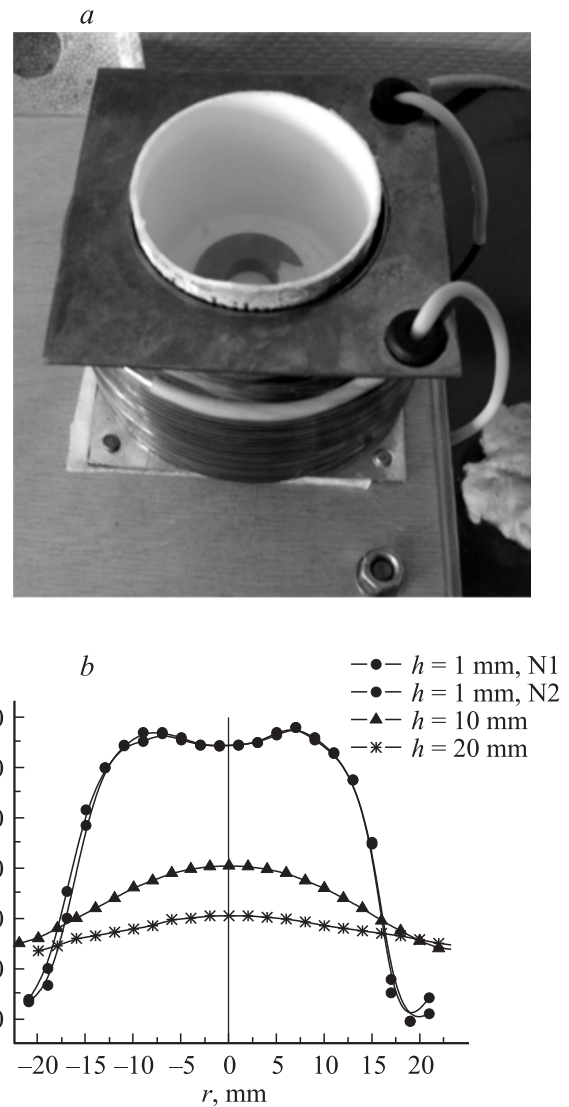
Таким образом, полученные методом MTG образцы характеризуются практически идеальной планарной текстурой и в них достижимы критические токи с плотностью до  $j_c = (10^7 - 10^8) \text{ A/m}^2$  при температуре  $T = 77 \text{ K}$  [12].

В экспериментах использовались образцы в виде колец, внешние диаметры которых равны 31 и 35 мм, внутренние — 15 и 16 мм, а их толщина составляла 3 и 8 мм соответственно. Плотность полученных образцов была равна  $6.2 \text{ g/cm}^3$ , что составляет 98% от рентгеновской плотности.

### 3. Эксперименты по захвату потока ВТСП-кольцами

Использование соотношений (1)–(5) для поиска левитирующих состояний ВТСП-колец, отобранных для проведения экспериментов, предполагает, что известны значения магнитных потоков, которые способны захватить эти ВТСП-кольца.

Предварительные оценки, опирающиеся на значения критических токов в образцах, позволили рассчитать и сконструировать соленоид, необходимый для проведения экспериментов по захвату магнитного потока ВТСП-кольцами.



**Рис. 4.** Эксперименты по захвату магнитного потока ВТСП-кольцом диаметром 35 мм: а — теплое ВТСП-кольцо, находящееся в стакане с теплоизолирующими стенками, размещено внутри намагничивающего соленоида; б — радиальное распределение компоненты  $B_z$  индукции магнитного поля ВТСП-кольца на различной высоте  $h$  от его поверхности при токе 50 А в витках намагничивающего соленоида.

Экспериментальная процедура по захвату ВТСП-кольцами магнитного потока выполнялась в следующей последовательности.<sup>1</sup> В отсутствие тока в витках соленоида теплое ВТСП-кольцо, погруженное в специальный стакан с теплоизолирующими стенками, размещалось внутри соленоида в его центральном горизонтальном сечении (рис. 4, а). Затем включался источник питания соленоида и устанавливалось заданное значение силы тока, протекающего по виткам соленоида (вплоть до 50 А). Затем в стакан с ВТСП-кольцом, находящийся внутри соленоида, заливался жидкий азот, кольцо охлаждалось

<sup>1</sup> Возбуждение сверхпроводящего тока в левитирующем кольце, описанное в эксперименте LDX [5], состояло из аналогичных этапов.

и захватывало магнитный поток. Для этого процесса требовалось в зависимости от массы кольца от 0.5 до 2 min. По прошествии необходимого времени выполнялось постепенное отключение источника питания соленоида, а именно ток в витках соленоида в течение нескольких десятков секунд доводился до нулевого значения.

Магнитное поле, захваченное каждым из указанных выше ВТСП-колец, было промерено экспериментально на различной высоте от их поверхности. На рис. 4, *b* показано несколько соответствующих экспериментальных распределений  $z$ -компоненты магнитного поля, измеренных для кольца диаметром 35 mm.

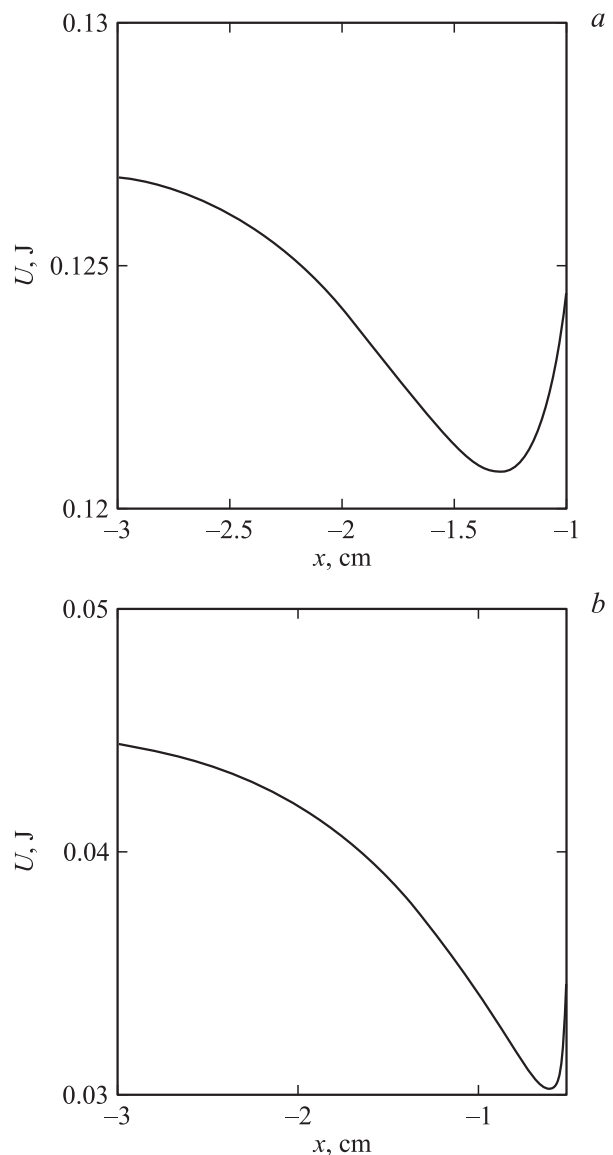
Используя измерения магнитной индукции, выполненные на высоте 1 mm от поверхности колец, были рассчитаны магнитные потоки, захваченные ВТСП-кольцами при различных токах в витках соленоида. Магнитный поток, захваченный ВТСП-кольцом диаметром 35 mm, возрастает пропорционально увеличению силы тока в витках соленоида и достигает максимального значения  $6.55 \cdot 10^{-5}$  Wb при токе 50 A в его витках. Аналогично магнитный поток, захваченный ВТСП-кольцом диаметром 31 mm, возрастает пропорционально увеличению силы тока в витках соленоида и достигает максимального значения  $3.18 \cdot 10^{-5}$  Wb<sup>2</sup> при токе 50 A в его витках.

Для оценки плотности сверхпроводящих токов, индуцируемых в ВТСП-кольцах при захвате магнитного потока, с помощью программы „FEMME“ были выполнены модельные расчеты, в которых ВТСП-кольцо заменялось обычным кольцом с током тех же размеров, но с разным распределением плотности тока по сечению. Оценки показывают, что для максимальных значений захваченных магнитных потоков средние плотности сверхпроводящих токов в этих кольцах находятся на уровне  $5 \cdot 10^7$  A/m<sup>2</sup>, что соответствует указанным выше плотностям критических токов для данных ВТСП-образцов.

#### 4. Поиск равновесных состояний системы сверхпроводящих колец в однородном поле силы тяжести

Используя соотношения (1–5) и экспериментальные данные по захвату потока для ВТСП-колец диаметром 35 и 31 mm, их конкретные размеры и массу, с помощью расчетов в системе Mathcad был выполнен поиск таких значений захваченных кольцами магнитных потоков, при которых существуют равновесные состояния левитирующего кольца в поле поддерживающего кольца с магнитными потоками одного и того же знака для указанных колец. Из найденного множества равновесных состояний отбирались такие, в которых расстояние между левитирующим нижним кольцом и закрепленным

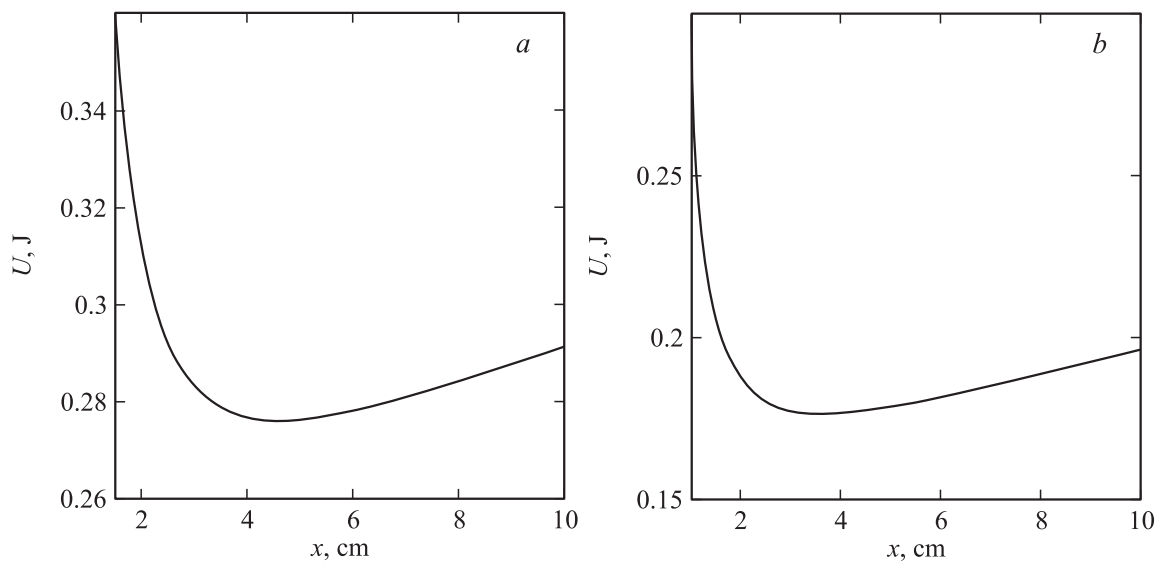
<sup>2</sup> Заметим, что каждое из приведенных выше значений потока является заниженным, поскольку часть силовых линий замыкается вне области интегрирования.



**Рис. 5.** Зависимость потенциальной энергии системы двух колец от координаты свободного кольца при захваченных потоках одного знака: *a* —  $R_1 = 1.275$ ,  $R_2 = 1.275$  cm,  $a_1 = 0.475$ ,  $a_2 = 0.475$  cm,  $\Phi_1 = 2.57 \cdot 10^{-5}$ ,  $\Phi_2 = 6.55 \cdot 10^{-5}$  Wb,  $m_2 = 40$  g; *b* —  $R_1 = 1.275$ ,  $R_2 = 1.15$  cm,  $a_1 = 0.475$ ,  $a_2 = 0.40$  cm,  $\Phi_1 = 2.57 \cdot 10^{-5}$ ,  $\Phi_2 = 3.18 \cdot 10^{-5}$  Wb,  $m_2 = 9.7$  g.

верхним было максимальным с тем, чтобы в эксперименте с реальными ВТСП-кольцами, имеющими конечную высоту, предусмотреть зазор между ними.

С учетом сказанного одно из возможных равновесных состояний свободного ВТСП-кольца диаметром 35 mm (играющего роль левитирующей миксины в ловушке-галатее) в поле закрепленного и расположенного сверху такого же ВТСП-кольца диаметром 35 mm достигается, если миксина захватила поток  $6.5 \cdot 10^{-5}$  Wb, а закрепленное кольцо — поток  $2.57 \cdot 10^{-5}$  Wb. На рис. 5, *a* приведен график зависимости потенциальной энергии



**Рис. 6.** Зависимость потенциальной энергии системы двух колец от координаты свободного кольца при захваченных потоках разного знака: *a* —  $R_1 = 1.275$ ,  $R_2 = 1.275$  cm,  $a_1 = 0.475$ ,  $a_2 = 0.475$  cm,  $\Phi_1 = -6.55 \cdot 10^{-5}$ ,  $\Phi_2 = 6.55 \cdot 10^{-5}$  Wb,  $m_1 = 40$  g; *b* —  $R_1 = 1.275$ ,  $R_2 = 1.15$  cm,  $a_1 = 0.475$ ,  $a_2 = 0.40$  cm,  $\Phi_1 = -6.55 \cdot 10^{-5}$ ,  $\Phi_2 = 3.18 \cdot 10^{-5}$  Wb,  $m_1 = 40$  g.

системы этих двух колец от координаты свободного кольца, причем локальный минимум достигается на расстоянии 13 mm между центральными сечениями колец. С учетом конечной толщины каждого кольца, равной 8 mm, в равновесном состоянии расстояние от поверхности левитирующего кольца-миксины до поверхности закрепленного кольца должно быть равно 5 mm.

Если роль левитирующей миксины выполняет ВТСП-кольцо диаметром 31 mm, а роль закрепленного и расположенного сверху кольца — ВТСП-кольцо диаметром 35 mm, то одно из возможных равновесных состояний миксины достигается, если кольцо диаметром 31 mm захватило поток  $3.18 \cdot 10^{-5}$  Wb, а кольцо диаметром 35 mm — поток  $2.57 \cdot 10^{-5}$  Wb. Соответствующий график показан на рис. 5, *b*. Если поменять кольца ролями, оставив прежними значения захваченных потоков, то минимум энергии их магнитного взаимодействия, естественно, останется в той же точке, а локальный минимум с учетом поля силы тяжести сместится вниз на 1 mm за счет большей массы кольца диаметром 35 mm.

С помощью расчетов в системе Mathcad был также выполнен поиск равновесных состояний для ВТСП-колец диаметрами 35 mm и 31 mm, захвативших магнитные потоки разного знака.

Расчеты, выполненные для захваченных одним из колец диаметром 35 mm потоков, лежащих в интервале от  $2.57 \cdot 10^{-5}$  до  $6.55 \cdot 10^{-5}$  Wb, а другим таким же кольцом — потоков в интервале от  $-2.57 \cdot 10^{-5}$  до  $-6.55 \cdot 10^{-5}$  Wb, показали, что энергетический минимум для этих колец существует всегда, и чем больше значения захваченных потоков, тем больше расстояние между „поддерживающим“ (закрепленным) кольцом

и миксиной, т.е. тем выше левитирует миксина. На рис. 6, *a* приводится график зависимости потенциальной энергии системы этих двух колец от координаты свободного кольца (играющего роль левитирующей миксины) для максимальных значений захваченных потоков: расположенная сверху миксина захватила отрицательный поток  $-6.55 \cdot 10^{-5}$  Wb, а закрепленное снизу кольцо — положительный поток  $6.55 \cdot 10^{-5}$  Wb, причем локальный минимум достигается на расстоянии 47 mm между центральными сечениями колец.

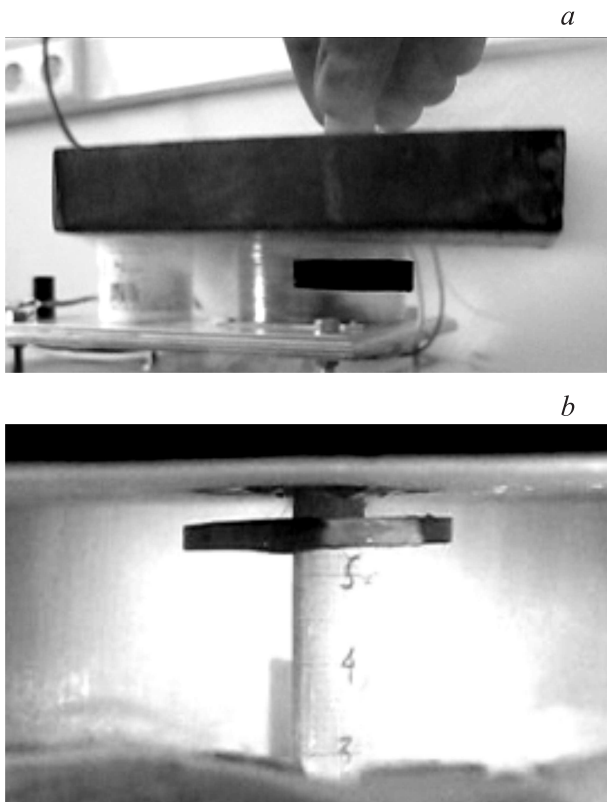
Тот же вывод относится к равновесию колец диаметрами 31 и 35 mm, которые захватили потоки разного знака. Если поток, захваченный закрепленным кольцом диаметром 31 mm, изменяется от  $1.25 \cdot 10^{-5}$  до  $3.18 \cdot 10^{-5}$  Wb, а поток, захваченный свободным кольцом диаметром 35 mm, от  $-2.57 \cdot 10^{-5}$  до  $-6.55 \cdot 10^{-5}$  Wb, то локальный минимум потенциальной энергии  $U(x)$  достигается на расстоянии 20 mm между центральными сечениями колец при минимальных значениях потоков и на расстоянии 37 mm — при их максимальных значениях. График зависимости  $U(x)$  для последнего случая приводится на рис. 6, *b*.

Заметим, что размеры реальных ВТСП-колец, использованных при проведении экспериментов, не удовлетворяли предположению, сделанному при выводе формул (4), (5): радиус сечения каждого из колец ( $a_k$ ) был лишь в несколько раз меньше среднего радиуса соответствующего кольца ( $R_k$ ), а не много меньше, как предполагалось. Поэтому найденные из расчетов координаты их равновесных состояний могут отличаться от тех, которые реализуются экспериментально.

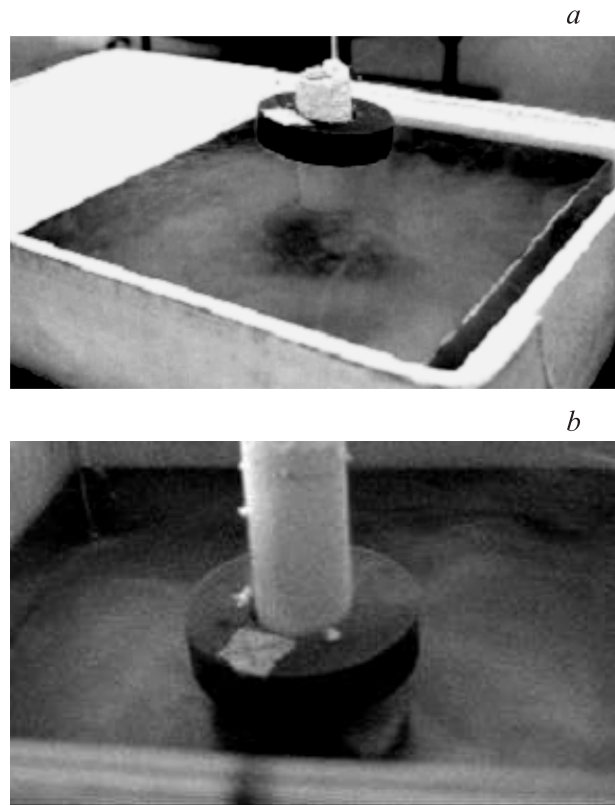
## 5. Экспериментальное определение равновесных состояний левитирующей сверхпроводящей миксины в поле поддерживающего сверхпроводящего кольца

Для проведения экспериментов по левитации сверхпроводящих колец-миксин в поле поддерживающего сверхпроводящего кольца было разработано и изготовлено демонстрационное устройство. Его основными узлами служат: нижний контейнер, в центре дна которого закреплен медный стержень для центровки системы, и съемный верхний контейнер с впаянной по центру дна медной трубкой. Установленные в нижнем контейнере подъемные механизмы позволяют перемещать по высоте сверхпроводящие кольца с помощью латунных лапок.

Эксперименты выполнялись в полном соответствии с расчетами (разд. 4), в результате которых были найдены значения захваченных ВТСП-кольцами потоков для осуществления равновесных состояний.



**Рис. 7.** Левитация ВТСП-миксины в поле расположенного сверху поддерживающего ВТСП-кольца диаметром 35 mm при захваченных потоках одного знака: *a* — левитация миксины диаметром 35 mm на воздухе:  $\Phi_1 = 2.57 \cdot 10^{-5}$  Wb,  $\Phi_2 = 6.55 \cdot 10^{-5}$  Wb; поддерживающее ВТСП-кольцо находится в верхнем контейнере; *b* — левитация миксины диаметром 31 mm внутри нижнего отсека демонстрационного устройства:  $\Phi_1 = 2.57 \cdot 10^{-5}$ ,  $\Phi_2 = 3.18 \cdot 10^{-5}$  Wb; поддерживающее ВТСП-кольцо находится в верхнем контейнере.



**Рис. 8.** Левитация ВТСП-миксины диаметром 35 mm в поле расположенного снизу поддерживающего ВТСП-кольца при захваченных потоках разного знака: *a* — неустойчивое левитирующее состояние ВТСП-миксины в поле нижнего закрепленного ВТСП-кольца 35 mm на высоте 3.5 cm (при расчетном значении 3.9 cm):  $\Phi_1 = -6.55 \cdot 10^{-5}$ ;  $\Phi_2 = 6.55 \cdot 10^{-5}$  Wb; закрепленное кольцо на дне верхнего отсека. *b* — устойчивое левитирующее состояние ВТСП-миксины в поле нижнего закрепленного ВТСП-кольца 31 mm на высоте 2.0 cm (при расчетном значении 3.1 cm):  $\Phi_1 = -6.55 \cdot 10^{-5}$ ;  $\Phi_2 = 3.18 \cdot 10^{-5}$  Wb; закрепленное кольцо на дне верхнего отсека.

Эксперименты, выполненные с ВТСП-миксиной диаметром 35 mm, захватившей магнитный поток  $6.55 \cdot 10^{-5}$  Wb, и поддерживающим ВТСП-кольцом того же диаметра, захватившим магнитный поток  $2.57 \cdot 10^{-5}$  Wb, оказались успешными и полностью подтвердили расчеты. На рис. 7, *a* приведена фотография осуществленной на воздухе устойчивой левитации миксины в поле закрепленного кольца, расположенного в верхнем контейнере демонстрационного устройства, причем расстояние между их поверхностями составляет 8 mm (при расчетном расстоянии 5 mm). На рис. 7, *b* приведена фотография устойчивого левитирующего состояния ВТСП-миксины диаметром 31 mm, находящейся в нижнем контейнере демонстрационного устройства, в поле закрепленного кольца диаметром 35 mm, расположенного в верхнем контейнере, при захваченных ими потоках одного знака. В обоих случаях экспериментально наблюдалось левитирующее состояние

миксины, устойчивое по отношению к вертикальным и к горизонтальным смещениям, а также к повороту вокруг горизонтальной оси.

Аналогично в соответствии с расчетами были выполнены эксперименты по левитации ВТСП-миксины в поле поддерживающего ВТСП-кольца, если они захватили потоки разного знака. Экспериментальные исследования равновесных состояний на устойчивость по отношению к смещениям миксины в горизонтальной плоскости и к ее повороту вокруг произвольной горизонтальной оси показали, что в одних случаях реализуются неустойчивые левитирующие состояния миксины (рис. 8, а), а в других — устойчивые (рис. 8, б).

## Заключение

Для ВТСП-колец, отобранных для проведения эксперимента, с помощью расчетов потенциальной энергии их магнитного взаимодействия в однородном поле силы тяжести были найдены значения захваченных ими потоков в пределах экспериментально измеренного интервала их значений, при которых одно кольцо левитирует в поле другого как для захваченных потоков одного знака, так и разных знаков.

Существование равновесных состояний любой пары из данных ВТСП-колец для захваченных потоков одного и того же либо противоположных знаков, найденных с помощью расчетов, было подтверждено экспериментально. При захвате кольцами потоков одного знака левитирующее состояние ВТСП кольца-миксины в поле закрепленного и расположенного сверху ВТСП-кольца оказалось устойчивым по отношению к вертикальным смещениям, к горизонтальным смещениям и к повороту вокруг горизонтальной оси. При захвате кольцами потоков разного знака найденные равновесные состояния ВТСП кольца-миксины были устойчивы по отношению к вертикальным смещениям, однако их устойчивость по отношению к повороту вокруг горизонтальной оси наблюдалась лишь для некоторых значений захваченных потоков.

Предварительные расчеты равновесных состояний по формулам (1–5) для трех сверхпроводящих колец, одно из которых закреплено, при захваченных ими потоках одного знака показывают, что для осуществления нужны сверхпроводящие кольца с сильно различающимися диаметрами и значениями захваченных потоков.

Предварительные эксперименты по осуществлению найденных из расчетов равновесных состояний системы трех сверхпроводящих колец, одно из которых закреплено, при захваченных ими потоках разного знака показывают, что в толстых ВТСП-кольцах при их сближении возникает сложное перераспределение сверхпроводящих токов, которое не учитывалось соотношениями (4), (5).

Проведенные расчеты и эксперименты указали на принципиальную возможность создания магнитной системы с несколькими левитирующими катушками, что

позволило разработать модель магнитной ловушки-галатеи на основе левитирующего квадруполья [15].

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.1291 и при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант № 12–01–00071.

## Список литературы

- [1] Морозов А.И., Савельев В.В. // УФН. 1998. Т. 168. № 11. С. 1153–1194.
- [2] Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М., Козинцева М.В., Лунатов А.С., Васильев В.И., Струнников В.М. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 3. С. 195–206.
- [3] Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М., Козинцева М.В., Лунатов А.С. // ЖТФ. 2007. Т. 76. Вып. 12. С. 15–20.
- [4] Бишаев А.М., Бугрова А.И., Козинцева М.В., Лунатов А.С., Сигов А.С., Харчевников В.К. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 10. С. 91–94.
- [5] Kesner J., Boxer A.C. et al. // Proc. of the 21<sup>st</sup> IAEA Fusion Energy Conf. Chengdu, China, 2006. Prep. IC/P7-7.
- [6] Yoshida Z., Ogawa Y. et al. // Proc. of the 21<sup>st</sup> IAEA Fusion Energy Conf. Chengdu, China, 2006. Prep. IC/P7-14.
- [7] Bishaev A.M., Bush A.A., Gladyshev I.V., Kamentsev K.Y., Kozintseva M.V. // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2011. N 17. P. 35–37.
- [8] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. С. 171, 257.
- [9] Смайт В. Электростатика и электродинамика. М.: ИЛ, 1954. С. 306.
- [10] Chaudhari P., Manhart J., Dimos D. et al. // Phys. Rev. Lett. 1988. Vol. 60. N 16. P. 1653–1655.
- [11] Flukijor R., Hensel B., Jaremie A. et al. // Appl. Supercond. 1993. Vol. 1. N 3–6. P. 709–723.
- [12] Лу С.Р., Олейников Н.Н., Гудилин Е.А. // Неорганические материалы. 1993. Т. 29. № 1. С. 3–17.
- [13] Буш А.А., Гордеев С.Н., Дубенко И.С. и др. // Информационные материалы 1-го рабочего совещания по проблемам высокотемпературной сверхпроводимости. Свердловск, УрО АН СССР, 1987. Ч. 1. С. 18–19.
- [14] Высокотемпературная сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования. Сб. статей. Вып. 1 / Под ред. А.А. Киселева. Л.: Машиностроение, 1990. 686 с.
- [15] Бишаев А.М., Буш А.А., Козинцева М.В. и др. Устройство левитирующего квадруполья. Патент РФ № 107656. 2011.