_____ МАГНИТНЫЕ ЛОВУШКИ

УДК 533.9

УСТОЙЧИВАЯ ЛЕВИТАЦИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МИКСИН ПЛАЗМЕННЫХ ЛОВУШЕК-ГАЛАТЕЙ

© 2018 г. М. В. Козинцева^{*a*, *}, А. М. Бишаев^{*a*}, А. А. Буш^{*a*}, М. Б. Гавриков^{*b*}, А. В. Десятсков^{*a*}, К. Е. Каменцев^{*a*}, В. В. Савельев^{*b*, *c*}, А. С. Сигов^{*a*}, Ю. И. Туснов^{*a*}

^а МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия ^b Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия ^c Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия * e-mail: kozintseva@mirea.ru Поступила в редакцию 15.06.2018 г. После доработки 28.06.2018 г.

Принята в печать 28.06.2018 г.

Разработка магнитных систем плазменных ловушек-галатей на основе левитирующих сверхпроводящих магнитных катушек требует поиска их устойчивых левитирующих состояний. Для этой цели, исходя из свойства сверхпроводников сохранять захваченный магнитный поток, в однородном поле силы тяжести в приближении тонких колец получена аналитическая зависимость потенциальной энергии системы из нескольких коаксиальных сверхпроволящих колец (причем одно из колец закреплено), захвативших заданные магнитные потоки, от координат свободных колец вдоль оси системы и углов отклонения их осей от общей оси системы. Расчеты в системе Mathcad показали, что при определенных значениях физических параметров (захваченный магнитный поток, размеры и массы колец) эта зависимость имеет локальные минимумы, которые соответствуют устойчивым состояниям равновесия левитирующих колец. Для высокотемпературных сверхпроводящих колец и короткозамкнутых ВТСП катушек, изготовленных для экспериментов по левитации, с помощью расчетов указанной зависимости для потенциальной энергии был выполнен поиск равновесных состояний в различных случаях. В случае, когда кольца захватили потоки одного знака, найденные из расчетов равновесные левитирующие состояния ВТСП кольца в поле короткозамкнутой ВТСП катушки (либо ВТСП кольца), устойчивые по отношению к вертикальным смешениям и к отклонению оси от вертикали, осуществлены экспериментально.

DOI: 10.1134/S0367292119010098

1. ВВЕДЕНИЕ

В классе ловушек-галатей [1-6] простейшей системой, формирующей область нулевого поля, является квадруполь. В термоядерном реакторе погруженные в плазму магнитные катушки (миксины – по терминологии А.И. Морозова [1]) таких ловушек должны левитировать. Фундаментальной задачей, на решение которой направлены vсилия исследовательского коллектива. является создание конфигурации магнитного поля, содержащей область нулевого поля ("магнитной бутылки"), на основе устойчиво левитирующей системы из двух сверхпроводящих катушек с током одного направления. Равновесные левитирующие состояния катушек должны обладать устойчивостью следующих типов: 1) относительно вертикальных смещений их плоскости вдоль общей оси; 2) относительно отклонения их оси от общей оси магнитной системы; 3) относительно радиальных смещений их плоскости. В настоящее время авторами выполняются систематические работы по поиску и осуществлению данных левитирующих состояний.

Следует отметить, что в существующих экспериментальных установках по удержанию плазмы магнитным полем левитирующего диполя он левитирует либо в поле закрепленной сверху сверхпроводящей катушки (установка LDX, США [7, 8]), либо – в поле закрепленной сверху несверхпроводящей катушки (установка RT-1, Япония [9, 10]). Поэтому проводятся параллельные исследования по нахождению равновесных состояний как системы катушек, состоящей только из сверхпроводников, так и системы, содержащей в качестве закрепленной обычную катушку с постоянным током.

Развитый нами подход [11–16] состоит в получении аналитической зависимости потенциальной энергии предлагаемых конфигураций от соответствующих переменных и поиске в системе Mathcad локальных минимумов такой зависимости, соответствующих устойчивым состояниям

равновесия. Аналитические зависимости потенциальной энергии различных магнитных систем были выведены авторами в предположении, что сверхпроводники сохраняют захваченный магнитный поток.

Экспериментальное осуществление устойчивых равновесных конфигураций [11—16] проводится в соответствии с расчетами, выполненными с использованием конкретных физических параметров сверхпроводящих (одно- или многовитковых ВТСП) колец [17], изготовленных для проведения экспериментов по левитации (величин захваченных ими магнитных потоков, размеров обычных и сверхпроводящих катушек-колец, масс левитирующих колец и т.д.).

Исследования были начаты с поиска равновесных левитирующих состояний сверхпроводящих катушек, устойчивых к вертикальным смещениям их плоскости вдоль общей оси [11–13]. Затем, следуя той же логике, выполнялся поиск левитирующих состояний, устойчивых и к вертикальным смещениям плоскости левитирующих катушек, и к отклонению их оси от общей оси магнитной системы [14, 15].

В [13, 15, 16] рассмотрен случай левитации сверхпроводящих колец в поле закрепленного несверхпроводящего кольца с постоянным током. С помощью расчетов в Mathcad потенциальной энергии в [15] были найдены левитирующие состояния сверхпроводящих колец, устойчивые к смещению их плоскости вдоль общей оси и к углам отклонения осей левитирующих колец от общей оси системы. При совпадающих по знаку потоках в кольцах существование найденных из расчетов равновесных левитирующих состояний для изготовленных ВТСП колец, устойчивых по отношению к вертикальным смещениям левитирующих колец и к отклонению их осей от вертикали, было подтверждено экспериментально [13, 15]. В [16] теоретически и экспериментально рассмотрена возможность осуществления левитирующих состояний сверхпроводящего кольца в поле закрепленного сверху несверхпроводящего кольца, устойчивых ко всем возможным отклонениям из него.

Настоящая работа посвящена поиску состояний равновесия сверхпроводящих колец, которые левитируют в поле закрепленного сверхпроводящего кольца, устойчивых как к смещению вдоль общей оси, так и к отклонению их оси от общей оси системы.



Рис. 1. Расположение колец: \mathbb{N}_{2} 1 — закрепленное сверхпроводящее кольцо, \mathbb{N}_{2} 2 и \mathbb{N}_{2} 3 — левитирующие сверхпроводящие кольца.

2. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СИСТЕМЫ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КОЛЕЦ КАК ФУНКЦИЯ КООРДИНАТ СВОБОДНЫХ КОЛЕЦ И УГЛОВ ОТКЛОНЕНИЯ ИХ ОСЕЙ

Рассматривается система сверхпроводящих колец, которая состоит из двух или трех коаксиальных колец, лежащих в параллельных горизонтальных плоскостях. Одно из колец закреплено. Пример схемы расположения колец дан на рис. 1. Координаты отсчитываются от закрепленного кольца. Кольца нумеруются сверху вниз. Предполагается, что радиус сечения каждого из колец a_i много меньше среднего радиуса соответствующего кольца R_i .

Вывод выражения для потенциальной энергии системы колец как функции координат свободных колец и углов отклонения их осей от общей оси магнитной системы в аналитической форме аналогичен выводу, приведенному в [12]. Считая, что потоки, захваченные сверхпроводящими кольцами, сохраняются, для системы из трех сверхпроводящих колец можем записать [18]:

$$L_{11}J_1 + L_{12}J_2 + L_{13}J_3 = \Phi_1,$$

$$L_{21}J_1 + L_{22}J_2 + L_{23}J_3 = \Phi_2,$$

$$L_{31}J_1 + L_{32}J_2 + L_{33}J_3 = \Phi_3,$$

$$L_{ik} = L_{ki},$$
(1)

где Φ_i — магнитный поток, захваченный *i*-м кольцом, L_{ik} — коэффициенты индукции, J_k — токи в кольцах. Однако теперь, в отличие от [11, 12], коэффициенты взаимоиндукции колец являются функциями не только координат левитирующих колец, но и углов отклонения их осей от вертикали. Решив систему (1) относительно токов, мы получим для них выражения как функции коор-

26

динат свободных колец и углов отклонения их осей от вертикали.

Пусть имеются два сверхпроводящих кольца, захвативших потоки Φ_1 и Φ_2 , соответственно, причем кольцо № 1 (верхнее) свободно, а кольцо № 2 (нижнее) — закреплено. Тогда выражение для потенциальной энергии $U(x, \theta_1)$ как функции координаты *x* свободного кольца (принимаем, что ось *x* направлена вверх) и угла отклонения θ_1 его оси от вертикали при наличии однородного поля гравитации запишется в виде [18]

$$U(x,\theta_{1}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{2} \Phi_{k} J_{k}(x,\theta_{1}) + m_{1} g x, \qquad (2)$$

где m_1 — масса кольца № 1. Формула (2) с точностью до замены индексов совпадает с выражением для $U(x, \theta_2)$ в [14], где рассматривается система двух сверхпроводящих колец с закрепленным верхним кольцом (№ 1) и левитирующим нижним (№ 2).

Анализ системы из трех сверхпроводящих колец, изображенной на рис. 1, показывает, что для обеспечения "независимости" углов отклонения θ_2 и θ_3 левитирующих колец № 2 и № 3 от вертикали, необходимо ввести в рассмотрение еще одну переменную — угол ϕ . Это угол между проекциями нормалей \mathbf{n}_2 и \mathbf{n}_3 к плоскостям колец № 2 и № 3 на горизонтальную плоскость. Теперь потенциальная энергия, формально совпадающая с выражением в [11, 12], является функцией и координат левитирующих колец x_2 и x_3 и углов θ_2 , θ_3 , ϕ :

$$U(x_2, x_3, \theta_2, \theta_3, \phi) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{3} \Phi_k J_k(x_2, x_3, \theta_2, \theta_3, \phi) + (3) + m_3 g x_2 + m_3 g x_3,$$

где *m*₂ и *m*₃ – масса второго и третьего кольца.

Для выполнения расчетов распределения потенциальной энергии были выведены формулы¹ для коэффициентов взаимоиндукции колец $L_{12}(x,\theta)$ для системы из двух колец и $L_{23}(x_2, x_3, \theta_2, \theta_3, \varphi) - для системы из трех колец,$ изображенной на рис. 1.

3. РАСЧЕТЫ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ СИСТЕМЫ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КОЛЕЦ ДЛЯ ПОИСКА ЛОКАЛЬНЫХ МИНИМУМОВ

Потенциальная энергия данной конфигурации является многопараметрической функцией. В предварительных исследованиях надо было ответить на вопрос, существует ли при каких-либо



Рис. 2. Эквипотенциали (Дж) системы двух сверхпроводящих колец (нижнее закреплено) в плоскости координата *x* свободного сверхпроводящего кольца – угол отклонения θ_1 его оси от вертикали. Однородное поле силы тяжести. $R_1 = 15$ см, $R_2 = 5$ см, $a_1 = 1$ см, $a_2 = 1$ см, $\Phi_1 = 10^{-3}$ Вб, $\Phi_2 = -10^{-3}$ Вб, $m_1 = 100$ г.



Рис. 3. То же, что на рис. 2, но при $R_1 = 10$ см, $R_2 = 10$ см, $a_1 = 1$ см, $a_2 = 1$ см, $\Phi_1 = 3.0 \times 10^{-4}$ B6, $\Phi_2 = 6.0 \times 10^{-4}$ B6, $m_1 = 10$ г.

значениях этих параметров (захваченный магнитный поток, размеры и масса колец и т.д.) локальный минимум потенциальной энергии.

С этой целью в Mathcad был выполнен поиск значений параметров, при которых для описанных выше случаев существует равновесное состояние системы сверхпроводящих колец, устойчивое относительно смещений левитирующих колец вдоль общей оси и углов отклонения их осей от нее. На рис. 2, 3, 4 показаны имеющие локальный минимум зависимости потенциальной энергии системы двух и трех сверхпроводящих колец от координат свободных колец и углов отклонения их осей, иллюстрирующие сказанное. Приведенные на рис. 2, 3 распределения эквипотенциа-

¹ Формулы для $L_{12}(x, \theta)$ и $L_{23}(x_2, x_3, \theta_2, \theta_3, \phi)$ не приводятся в силу громоздкости. Формулы для L_{ii} и $L_{ik}(x_i, x_k)$ приведены в [12].

(a) (б) 145.8 x_3 , cM -30 ^{*} 145.6 -32 145.4 103 -1 0 -14-12θ₂, рад -10 х₂, см (г) (B) 145.4152 145.42 <u>A</u>145.41515 × 145.41 145.4151 145.40 -2 0 2 0 1 ф, рад θ₃, рад

Рис. 4. Поиск устойчивых по координатам x_2 и x_3 и углам отклонения θ_2 , θ_3 , φ левитирующих состояний двух сверхпроводящих колец в поле закрепленного сверху сверхпроводящего кольца для потоков одного знака ($R_1 = 20$ см, $R_2 = 10$ см, $R_3 = 20$ см, $a_1 = 1$ см, $a_2 = 1$ см, $a_3 = 1$ см, $\Phi_1 = 1.5 \times 10^{-2}$ Вб, $\Phi_2 = 1.2 \times 10^{-3}$ Вб, $\Phi_3 = 1 \times 10^{-3}$ Вб, $m_2 = 100$ г, $m_3 = 10$ г): а) – эквипотенциали (Дж) системы трех сверхпроводящих колец (верхнее № 1 закреплено) в плоскости координат x_2 и x_3 левитирующих колец, при $\theta_2 = 0$, $\theta_3 = 0$, $\varphi = 0$; б) – исследование на устойчивость по θ_2 (углу отклонения $x_2 = -29.954$ см, $\theta_3 = 0$, $\varphi = 0$; в) – исследование на устойчивость по θ_3 (углу отклонения от оси нижнего левитирующего кольца $N_2 = -12.015$ см, $x_3 = -29.954$ см, $\theta_2 = 0$, $\varphi = 0$; в) – исследование на устойчивость по θ_3 (углу отклонения от оси нижнего левитирующего кольца $N_2 = -12.015$ см, $x_3 = -29.954$ см, $\theta_2 = 0$, $\varphi = 0$; г) – исследование на устойчивость по φ (углу отклонения равновесия с координатами $x_2 = -12.015$ см, $x_3 = -29.954$ см, $\theta_2 = 0$, $\varphi = 0$; г) – исследование на устойчивость по φ (углу между проекциями нормалей \mathbf{n}_2 и \mathbf{n}_3 к плоскостям колец $N_2 2$ и $N_2 3$ на горизонтальную плоскость) положения равновесия с координатами $x_2 = -12.015$ см, $x_3 = -29.954$ см, $\theta_2 = 0$, $\theta_3 = 0$.

лей демонстрируют наличие устойчивого по x и θ_1 равновесного состояния для системы двух колец, если закреплено нижнее кольцо и кольца захватили потоки разного знака (рис. 2) или одного знака (рис. 3).

Распределение эквипотенциалей, отвечающее устойчивому по x и θ_2 равновесному состоянию для системы двух колец в случае, когда закреплено верхнее кольцо и кольца захватили потоки одного знака, найдено в [14].

Для системы трех колец, показанной на рис. 1, число переменных, от которых зависит потенциальная энергия системы, возрастает до пяти: координаты x_2 и x_3 и углы θ_2 , θ_3 , φ . Поиск устойчивых левитирующих состояний в этом случае предлагается проводить последовательно. Задав значения физических параметров, сначала находим область значений переменных x_2 и x_3 , в которой реализуются равновесные левитирующие состояния сверхпроводящих колец, устойчивые к смещениям вдоль общей вертикальной оси (рис. 4а). Затем эта область параметров исследуется на устойчивость по θ_2 , θ_3 и ϕ , соответственно (рис. 46, 4в и 4г). Из приведенных на рис. 4а, б, в, г распределений эквипотенциалей следует, что при выбранных значениях параметров левитирующее состояние с координатами $x_2 = -12.015$ см, $x_3 =$ = -29.954 см, $\theta_2 = 0$, $\theta_3 = 0$, $\phi = 0$ является устойчивым по отношению к смещениям левитирующих колец вдоль общей вертикальной оси, а также к отклонениям их осей от вертикали и безразличным по углу φ.



Рис. 5. Поиск равновесных состояний ВТСП кольца Ø31 мм в поле расположенной сверху закрепленной катушки из ВТСП ленты диаметром 60 мм в однородном поле силы тяжести для потоков одного знака: а) – эквипотенциали (Дж) системы двух сверхпроводящих колец (верхнее закреплено) на плоскости координата *x* левитирующего кольца – угол отклонения θ_2 его оси от вертикали. Однородное поле силы тяжести, $R_1 = 3.125$ см, $R_2 = 1.15$ см, $a_1 = 0.26$ см, $a_2 = 0.4$ см, $\Phi_1 = 5.0 \times 10^{-4}$ Вб, $\Phi_2 = 3.18 \times 10^{-5}$ Вб, $m_2 = 9.7$ г; б) – фотография устойчивого левитирующего состояния ВТСП кольца Ø31 мм в поле расположенного сверху закрепленного кольца из ВТСП ленты Ø60 мм (находится в контейнере), соответствующего расчетным распределениям на рис. 5а.

4. ПОИСК ЛЕВИТИРУЮЩИХ СОСТОЯНИЙ ВТСП КОЛЕЦ, УСТОЙЧИВЫХ К СМЕЩЕНИЮ ВДОЛЬ ОСИ И К УГЛУ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ НЕЕ

Поиск устойчивых к смещению вдоль оси левитирующих состояний ВТСП кольца в поле закрепленного ВТСП кольца с помощью расчетов в Mathcad аналитической зависимости U(x) был

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 45 № 1 2019

проделан в [11, 12] для ВТСП колец, изготовленных из предварительно синтезированного порошка ВТСП фазы $YBa_2Cu_3O_y$ с использованием метода МТG [19]. Внешние диаметры колец равны 31 мм и 35 мм, внутренние — 15 мм и 16 мм, а их толщина составляла 3 мм и 8 мм, соответственно. Осуществленные в эксперименте, в соответствии с расчетами U(x) для данных ВТСП колец, левитирующие состояния ВТСП кольца в поле закрепленного верхнего ВТСП кольца при захваченных ими потоках одного знака оказались устойчивыми не только к смещению его плоскости по вертикали (вдоль общей оси), но и к углу отклонения θ_2 его оси от вертикали.² Расчеты по аналитической зависимости $U(x, \theta_2)$, выполненные в [14], подтвердили это.

Аналитические зависимости $U(x, \theta_1)$, etc. были получены для тонких колец ($a_i \ll R_i$). Для того чтобы размеры ВТСП колец соответствовали теоретическим предположениям, были изготовлены короткозамкнутые многовитковые катушкикольца различного диаметра (50 мм, 60 мм и 80 мм) из ВТСП ленты типа SCS4050-i-AP 2G HTS (фирма-изготовитель данного провода – SUPER POWER [20]). Свойства данных колец изложены в [17]. Зная диапазон захваченных кольцами магнитных потоков, их размеры и массы, для катушек-колец из ВТСП ленты и упоминавшихся выше колец из ВТСП керамики, с помощью расчетов в системе Mathcad по зависимости U(x, θ₂) распределений эквипотенциалей, был выполнен поиск устойчивых по x и θ_2 левитирующих состояний ВТСП кольца (либо катушкикольца) в поле закрепленной сверху короткозамкнутой ВТСП катушки. Предполагалось, что кольца и катушки захватили потоки одного знака.

В качестве примера на рис. 5а приводится распределение эквипотенциалей, найденное по зависимости $U(x, \theta_2)$, позволившее определить значения захваченных ВТСП кольцами потоков Φ_1 и Φ_2 , при которых левитирующее состояние ВТСП кольца диаметром 31 мм в поле закрепленной сверху катушки-кольца из ВТСП ленты диаметром 60 мм устойчиво и к смещению его плоскости по вертикали (вдоль общей оси), и к углу отклонения θ_2 его оси от вертикали.

Существование найденного из этих расчетов левитирующего состояния ВТСП кольца Ø31 мм, устойчивого по x и θ_2 , подтверждено экспериментально. На рис. 56 приводится фотография левитирующего состояния этого кольца, которое соответствуют распределениям потенциальной энергии на рис. 5а.

Аналогично с помощью расчетов в системе Mathcad по зависимости $U(x_2, x_3, \theta_2, \theta_3, \varphi)$ распределений эквипотенциалей был выполнен поиск устойчивых относительно смещений вдоль оси и углов отклонения от нее левитирующих состояний двух ВТСП колец (одного – из ВТСП ленты и другого – из ВТСП керамики) в поле закрепленного верхнего кольца из ВТСП ленты, когда все три сверхпроводящих кольца захватили потоки одного знака.

Предварительные эксперименты по левитации короткозамкнутых ВТСП катушек с активным сопротивлением спая на уровне 20–30 нОм выявили ряд особенностей их поведения. Причины такого поведения ВТСП катушек пока не ясны, так что требуется более глубокое исследование.

5. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В заключение заметим, что для сверхпроводящих колец, способных сохранять захваченный ими магнитный поток, аналитические зависимости $U(x, \theta_1), U(x_2, x_3, \theta_2, \theta_3, \phi)$ позволяют, в силу своей общности, определить область устойчивости по x и θ при любых значениях физических параметров. Однако для полного решения задачи о поиске устойчивых левитирующих состояний сверхпроводящих колец (миксин ловушки-галатеи) необходимо вывести в наших предположениях зависимости $U(x, \delta)$ – для системы двух колец и $U(x_2, x_3, \delta_2, \delta_3, \psi)$ для системы трех колец, где δ_k — радиальные смещения осей левитирующих колец относительно общей оси системы в горизонтальной плоскости, ψ – угол между радиусами-векторами смешения осей колец в горизонтальной плоскости. В частности, в [16] с помозависимостей потенциальной энергии шью $U(x, \theta_2)$ и $U(x, \delta_2)$ решена задача о нахождении устойчивых по координатам x, θ и r левитирующих состояний сверхпроводящего кольца в поле закрепленного сверху несверхпроводящего кольца с постоянным током.

Авторы выражают признательность к.ф.-м.н. И.Ф. Волошину за полезные советы по технологии изготовления короткозамкнутых ВТСП катушек.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект № 8.4853.2017/БЧ и проект № 3.5160.2017/БЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Морозов А.И., Савельев В.В. // УФН. 1998. Т. 168. С. 1153.
- 2. Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М., Козинцева М.В., Липатов А.С., Васильев В.И., Струнников В.М. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. С. 195.
- Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М., Козинцева М.В., Липатов А.С. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 12. С. 15.
- Бишаев А.М., Бугрова А.И., Козинцева М.В., Липатов А.С., Сигов А.С., Харчевников В.К. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 10. С. 91.
- Бишаев А.М., Бугрова А.И., Гавриков М.Б., Козинцева М.В., Липатов А.С., Савельев В.В., Сигов А.С., Смирнов П.Г., Тарелкин И.А., Храмцов П.П. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 4. С. 34.

 $^{^{2}}$ А также к радиальным смещениям.

- Бишаев А.М., Бугров Г.Э., Десятсков А.В., Козинцева М.В., Огарков П.В., Сазонов П.Г., Гавриков М.Б., Савельев В.В. // Российский технологический журнал. 2015. № 2 (7). С. 101. Электронное сетевое издание ISSN 2500-316Х. Электронный ресурс. Режим доступа: https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/7ff/09-bishaev.pdf
- Schultz J.H., Driscoll G., Garnier D., Kesner J., Mauel M., Minervini J.V., Smith A., Radovinsky A., Snitchler G., Zhukovsky A. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2001. V. 11. P. 2004.
- Boxer A.C., Bergmann R., Ellsworth J.L., Garnier D.T., Kesner J., Mauel M.E., Woskov P. // Nature Physics. 2010. V. 6. P. 207.
- Saitoh H., Yoshida Z., Morikawa J., Yano Y., Mizushima T., Kobayashi M. // J. Fusion Energy. 2010. V. 29. P. 553.
- 10. Yano Y., Yoshida Z., Ogawa Y., Morikawa J., Saitoh H. // Fusion Eng. Des. 2010. V. 85. P. 641.
- Бишаев А.М., Буш А.А., Гавриков М.Б., Козинцева М.В., Каменцев К.Е., Савельев В.В., Сигов А.С. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 19. С. 23.
- Бишаев А.М., Буш А.А., Гавриков М.Б., Козинцева М.В., Каменцев К.Е., Савельев В.В., Сигов А.С., Денисюк А.И., Гордеев И.С. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 5. С. 61.

- Бишаев А.М., Буш А.А., Гавриков М.Б., Денисюк А.И., Каменцев К.Е., Козинцева М.В., Савельев В.В., Сигов А.С. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 6. С. 155.
- Bishaev A.M., Bush A.A., Behtin M.A., Gavrikov M.B., Gordeev I.S., Bugrova A.I., Kamentsev K.Ye., Kozintseva M.V., Savel'ev V.V., Safronov A.A., Shaposhnikov M.I., Smirnov P.G. // Problems of Atomic Sciences and Technology. Ser.: Plasma Phys. 2013. № 1. P. 48.
- Bishaev A.M., Bush A.A., Gavrikov M.B., Denis'uk A.I., D'yakonitsa O.Y., Kamentsev K.Y., Kozintseva M.V., Kolesnikova T.G., Savelyev V.V., Smirnov P.G., Shapovalov M.M., Voronchenko S.A. // Problems of Atomic Sciences and Technology. Ser.: Plasma Phys. 2015. № 1. P. 16.
- Бишаев А.М., Буш А.А., Гавриков М.Б., Каменцев К.Е., Козинцева М.В., Савельев В.В., Сигов А.С. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 11. С. 137.
- Козинцева М.В., Бишаев А.М., Буш А.А., Гавриков М.Б., Каменцев К.Е., Нижельский Н.А., Савельев В.В., Сигов А.С. // ЖТФ. 2017. Т. 87. С. 875.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. С. 171, 257.
- 19. Vanderbemden Ph., Cloots R., Ausloos M. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1999. V. 9. P. 2308.
- 20. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire