

## ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА В ИССЛЕДОВАНИИ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА КОЛЬЦЕВОЙ ФОРМЫ

*Аннотация.* Цель работы: исследование кривой намагничивания в зависимости магнитного поля сверхпроводящего кольца  $B_K(i)$  и магнитного поля соленоида  $B_C(i)$  от скорости изменения магнитного потока через отверстие кольца. Материал и методы исследования: проведены эксперименты по измерению критического тока высокотемпературного сверхпроводящего (ВТСП) кольца индуктивным методом. Основная особенность индуктивного метода снятия кривых намагничивания заключается в том, что ВТСП-кольцо взаимодействует только с собственным магнитным полем, и отсутствует непосредственное воздействие внешнего магнитного поля на данный образец. Измеряется магнитное поле, создаваемое ВТСП-кольцом, который наводится путем введения внешнего магнитного потока в отверстие кольца с помощью соленоида с постоянным током. Одним из достоинств проведенных экспериментальных работ является то, что в эксперименте наглядно продемонстрировано действие двух законов, описывающих индуктивные токи и диапазоны действия этих законов. При этом показано, для ВТСП образцов при токах  $I < I_{2c}$  выполняется закон сохранения магнитного потока; для образцов в резистивном (или частично резистивном) состоянии при токах  $I \geq I_{2c}$  выполняется закон электромагнитной индукции. Поскольку на вещество кольца отсутствует непосредственное воздействие внешнего магнитного поля, из кривой намагничивания наблюдаем, что кривая магнитного поля кольца  $B_K(i)$  проходит параллельно оси внешнего магнитного поля  $B_C(i)$  и не зависит от скорости изменения магнитного потока. С помощью исследования хода кривой намагничивания от скорости изменения магнитного потока установлено явление эквидистантности кривых намагничивания при кратных скоростях изменения магнитного потока. В результате найдено новое соотношение для вольтамперной характеристики ВТСП для области токов, близких к критическому. При этом наиболее важным является то, что характер перехода не зависит от типа и структуры и микроструктуры сверхпроводника, а определяется только лишь законом сохранения магнитного потока.

*Ключевые слова:* керамические высокотемпературные сверхпроводники, кольцевой образец, ток индукции, собственное магнитное поле, кривая намагничивания, закон сохранения магнитного потока, закон электромагнитной индукции, вольтамперная характеристика.

L. A. Suvorova, A. R. Buev

## APPLICATION OF MAGNETIC FLUX CONSERVATION LAW IN RESEARCH OF CRITICAL STATES OF HTSC RING-SHAPED SAMPLE

*Abstract.* Objective of the work is to study the magnetization curve as a function of the magnetic field of a superconducting ring  $B_K(i)$  on the magnetic field of the sole-

noid  $B_C(i)$  on the velocity of change of magnetic flux through the hole of the ring. Material and Methods: Experiments were conducted to measure the critical current of HTSC ring inductive method. The main feature of the inductive method of magnetization curves removal is that HTSC ring interacts only with its own magnetic field and there is no direct effect of the external magnetic field on the sample. The authors measure the magnetic field generated by HTSC ring, which is induced by administration of the external magnetic flux in the ring hole by means of solenoid with constant current. One of the advantages of the conducted experimental work is the fact that the experiment clearly demonstrates the action of two laws describing the inductive currents and the ranges of these laws. It is shown, for HTSC samples at currents  $I < I_{2c}$  – it is the law of conservation of magnetic flux, and for the samples in the resistive (or partially resistive) state, with the currents  $I \geq I_{2c}$  – it is the law of electromagnetic induction. As the material of the ring is not a directly affected by the external magnetic field of the magnetization curve, the curve of the magnetic field extends parallel to the ring axis of the external magnetic field and depends on the velocity of change of magnetic flux. By means of the magnetization curve study to velocity of magnetic flux change the researchers determined the phenomenon of equidistance of magnetization curve on the multiple velocities of magnetic flux change. As a result the authors discovered a new correlation for the voltage-current characteristic of HTSC for area of near-critical current. Thus the most important fact is that nature of transition doesn't depend on type and structure and superconductor microstructure, and is defined only by the law of magnetic flux conservation.

*Key words:* ceramic HTSC, ring sample, induction current, self-magnetic field, magnetization curve, magnetic flux conservation law, law of electromagnetic induction, voltage-current characteristic.

### Введение

Проведены эксперименты по измерению критического тока кольца высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) индуктивным методом [1, 2]. Основная особенность заключается в том, что индуктивный метод снятия кривых намагничивания к специальному исследованию взаимодействия ВТСП-кольца непосредственно только с собственным магнитным полем. Измеряется магнитное поле, создаваемое ВТСП-кольцом, который наводится путем введения внешнего магнитного потока в отверстие кольца с помощью соленоида с постоянным током. В силу того, что магнитное поле длинного соленоида сосредоточено только внутри него, построены индуктивные кривые с помощью двух датчиков Холла, один из которых находится в плоскости сверхпроводящего кольца, а второй – вдалеке от кольца, внутри соленоида. Разность напряжений датчиков Холла дает величину собственного магнитного поля ВТСП-кольца.

#### 1. Бесконтактный метод и устройство для измерения критического тока ВТСП-кольца и других его характеристик. Экспериментальная кривая

В работе используется способ бесконтактного измерения критического тока ВТСП-кольца и других его параметров [2–4]. В данной работе проводится анализ экспериментальных результатов. Измерительная ячейка, которая используется в эксперименте, представлена на рис. 1 [3].

Данным методом исследованы несколько сотен поликристаллических ВТСП-образцов кольцевой формы составов  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ ,

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ ,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ . В результате эксперименты коррелируют с результатами, полученными известными методами [5]. В то же время найдены новые закономерности в результате особенностей данного метода измерения, главной из которых является то, что кольцо взаимодействует только с собственным магнитным полем. Это достигается тем, что внешнее магнитное поле вводится внутрь кольца с помощью соленоида (рис. 1). В результате полностью отсутствует непосредственное воздействие внешнего магнитного поля на вещество кольца и воздействует на него индуктивно, т.е. посредством закона сохранения магнитного потока.

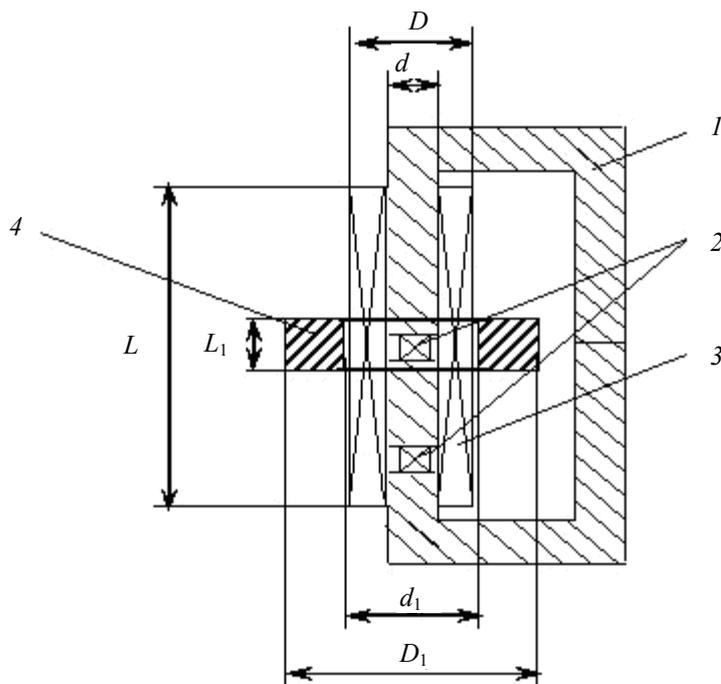


Рис. 1. Измерительная ячейка для бесконтактного исследования сверхпроводящих параметров ВТСП-колец: 1 – магнитозамкнутый сердечник из магнитомягкого материала (используется в тех случаях, когда необходимо усиление магнитного поля); 2 – датчик (магнитного поля) Холла; 3 – соленоид; 4 – ВТСП-кольцо

На длинный соленоид с двумя датчиками Холла внутри него надевается ВТСП-кольцо так, чтобы один из датчиков находился в центре кольца, а другой – вне этого кольца. Вся измерительная ячейка (с двумя датчиками Холла) замораживается в жидком азоте до температуры 77 К.

После замораживания в соленоид подается ток, который создает магнитное поле  $B_C(i)$ , пронизывающее кольцевой образец, при этом не взаимодействуя с веществом образца. С помощью датчиков Холла измеряется зависимость  $B_K(i)$  магнитного поля сверхпроводящего кольца от магнитного поля соленоида  $B_C(i)$ .

В результате измерений строится зависимость  $B_K(B_C)$ , представленная на рис. 2. Скорость изменения магнитного потока задается скоростью изме-

нения тока соленоида  $v = di / dt = \text{const}$ . На рис. 2 представлены три кривых намагничивания для трех кратных скоростей  $v_m$  ( $m = 1, 2, 3$ ) изменения магнитного поля соленоида. При этом гистерезисные кривые оказываются эквидистантными.

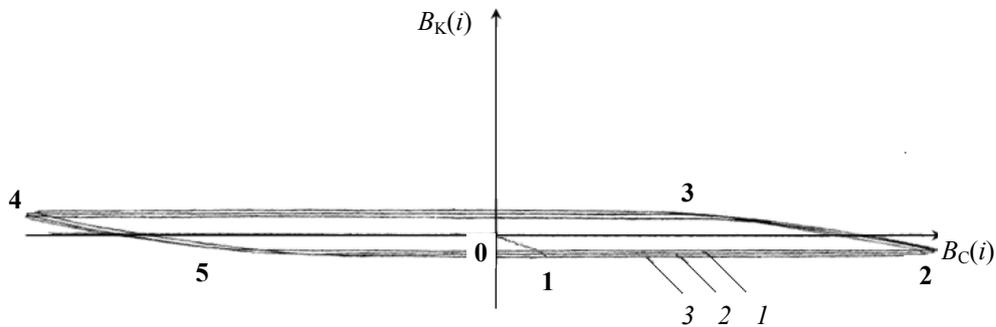


Рис. 2. Кривые намагничивания  $B_K(B_C)$  для трех скоростей роста тока соленоида  $v_m$  ( $m = 1, 2, 3$ ), порождающего магнитное поле  $B_C(i)$  при:

$$1 - v_1 = 0,3 \text{ мА/с}; 2 - v_2 = 3 \text{ мА/с}; 3 - v_3 = 30 \text{ мА/с}$$

Участки **3-4** и **5-2** проходят строго параллельно оси  $B_C(i)$ .

С ростом скорости  $v_m$  расстояния между соответствующими кривыми  $B_K(B_C)$  увеличиваются до тех пор, пока при достаточно больших скоростях  $v_m$  они не становятся эквидистантными. При  $v_m \rightarrow 0$  расстояния между кривыми  $B_K(B_C)$  стремятся к нулю.

## 2. Закон электромагнитной индукции и закон сохранения магнитного потока для сверхпроводящего кольца

Особенностью кривой намагничивания (см. рис. 2) является то, что кривая магнитного поля кольца  $B_K(i)$  проходит параллельно оси внешнего магнитного поля  $B_C(i)$ . Следует отметить, что во многих аналогичных экспериментах эта зависимость имеет вид, приведенный на рис. 3.

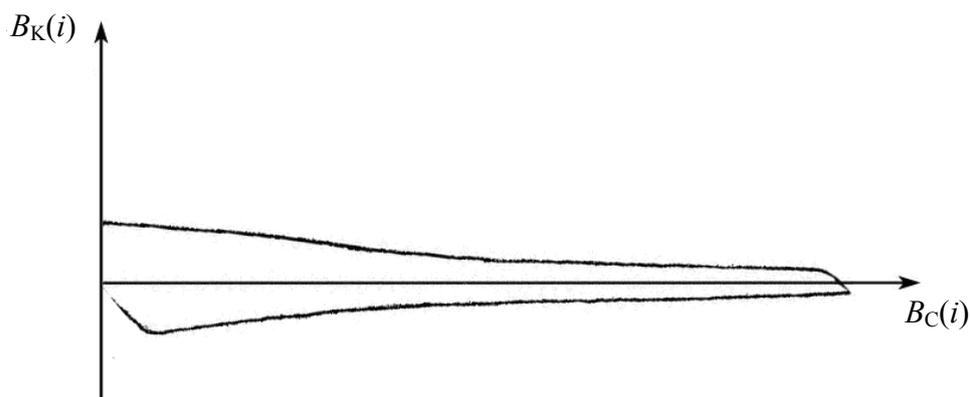


Рис. 3. Зависимость  $B_K(B_C)$  в случае размещения

ВТСП-кольца внутри соленоида с током  $i$  [5, 7]

То есть собственное магнитное поле кольца убывает. Это объясняется тем, что сверхпроводящее вещество кольца подвержено действию трех факторов, это: сверхпроводящий ток кольца, магнитное поле сверхпроводящего тока кольца и магнитное поле соленоида. В результате воздействия магнитного поля соленоида на вещество критический ток кольца, а также создаваемое им магнитное поле кольца убывают, поскольку в этом случае магнитное поле подавляет сверхпроводящее состояние кольца (эффект Мейсснера – Оксенфельда) [6]. На соответствующих кривых намагничивания (см., например, [5]) описанный процесс приводит к тому, что участок **1-2** гистерезисной кривой приближается к оси  $B_C(i)$  вплоть до пересечения с нею. Сверхпроводящий ток и соответствующее магнитное поле равны нулю, а ВТСП-кольцо переходит полностью в резистивное состояние.

Такое существенное отличие экспериментальных кривых  $B_K(B_C)$  (рис. 2, 3) объясняется тем, что в нашем эксперименте внешнее магнитное поле создается соленоидом, вставленным в отверстие кольца, и поэтому внешнее магнитное поле не имеет непосредственного контакта с веществом, т.е. не действует эффект Мейсснера – Оксенфельда.

В нашем эксперименте собственное магнитное поле кольца взаимодействует с веществом кольца и при этом при достижении критического состояния ток кольца и его магнитное поле остаются постоянными при любых значениях магнитного поля, создаваемого соленоидом, вставленным внутрь кольца.

До т.  $I$  (см. рис. 2) сверхпроводящий ток в кольце и соответствующее собственное магнитное поле определяются законом сохранения магнитного потока: магнитный поток от собственного поля кольца равен магнитному потоку от внешнего поля кольца с противоположным знаком. После т.  $I$  (см. рис. 2) поток магнитного поля от собственного тока остается постоянным. Несмотря на дальнейшее увеличение внешнего магнитного поля, происходит кажущееся «нарушение» закона сохранения магнитного потока на участке **1–2**. Это легко объясняется тем, что малейшему увеличению сверхпроводящего тока кольца (для собственного магнитного поля выше критического) соответствует частичная потеря сверхпроводимости и переход в частично резистивное состояние. В этом случае, как следует из эксперимента, закон сохранения магнитного потока для образца уже не выполняется. Сказанное наглядно подтверждается многочисленными экспериментами ВТСП-образцов различных составов. После т.  $I$  (см. рис. 2) увеличение собственного тока кольца происходит при увеличении скорости роста внешнего магнитного поля, что будет объяснено в дальнейшем.

В рамках вышеописанного эксперимента проводились также исследования собственного магнитного поля от скорости увеличения внешнего магнитного поля. Установлено, что с ростом скорости происходит некоторое «разбухание» гистерезисной кривой намагничивания, т.е. некоторый дополнительный прирост тока, магнитного поля кольца. Было также установлено, что при кратных скоростях увеличения внешнего магнитного поля образуется семейство кривых намагничивания, особенностью которого является его эквидистантность. Этот эффект может быть объяснен следующим образом. По-

сколько ВТСП-кольцо достигает в т. 1 (см. рис. 2) критического состояния, то прибавка к току является резистивной и определяется законом электромагнитной индукции. Именно закону электромагнитной индукции подчиняется ВТСП-образец, достигший критического состояния, поскольку рост тока выше критического возможен только при частично резистивном состоянии.

На рис. 4 изображен фрагмент рис. 2, соответствующий начальному участку 0–1 кривых  $B_K(B_C)$ , полученных при различных скоростях  $v_m$ .

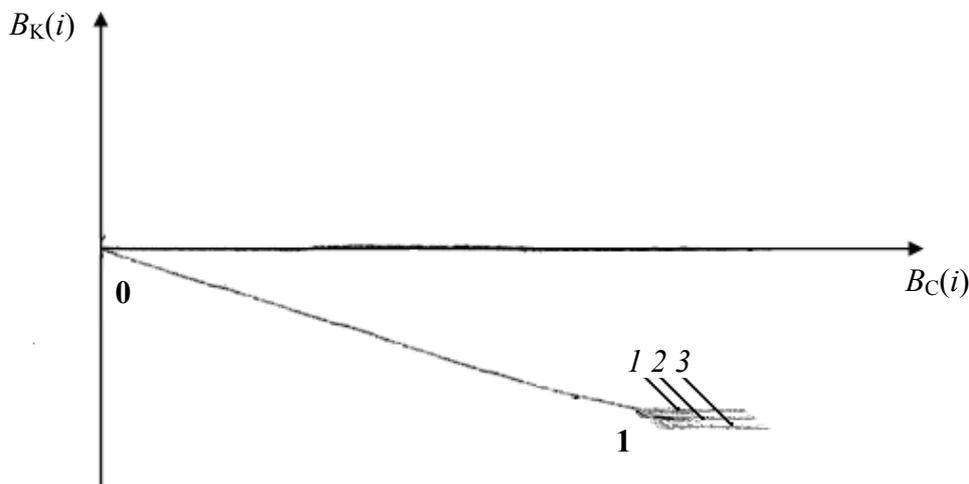


Рис. 4. Начальные участки кривых намагничивания  $B_K(B_C)$  ( $m = 1, 2, 3, 4$ ), построенные при кратных скоростях  $v_m$ : 1 –  $v_2 = 0,3$  мА/с; 2 –  $v_3 = 3$  мА/с; 3 –  $v_4 = 30$  мА/с

Из рис. 4 следует, что на участке 0–1 кривые идут по одной линии и только после т. 1 кривые расходятся в семейство эквидистантных кривых намагничивания. Следует отметить, что эксперименты проводились при гораздо большем, чем это изображено на рис. 2 и 4, числе (10–20) кратных скоростей  $v_m$ .

Из обнаруженного эффекта эквидистантности кривых намагничивания при различных кратных скоростях увеличения внешнего магнитного поля можно определить вольтамперную характеристику ВТСП-кольца для токов больших или равных критическому  $I_{2c}$ . Расстояние между кривыми равно резистивной прибавке к критическому току  $I_{2c}$  вследствие эффекта электромагнитной индукции. Это означает, что при  $I > I_{2c}$  в нашей постановке эксперимента начинает действовать ЭДС индукции  $\epsilon$ , порождающий этот самый ток. Из эквидистантности кривых намагничивания может быть определена зависимость  $I(\epsilon)$ . Вследствие эквидистантности зависимость  $I(\epsilon)$  может быть логарифмического вида:

$$I(\epsilon) = I_{2c}[1 + \alpha \ln(1 + \beta\epsilon)], \quad (1)$$

где  $I_{2c}$  – максимальный критический кольцевой ток;  $\alpha$ ,  $\beta$  – константы.

В большинстве работ вольт-амперная характеристика (ВАХ) представлена в виде зависимости  $\epsilon(I)$  [5, 7], поэтому (1) потенцируем в виде зависимости  $U(I) = \epsilon(I)$ , где  $U$  – напряжение:

$$U(I) = \frac{1}{\beta} \left( e^{\frac{I/I_{2c}-1}{\alpha}} - 1 \right). \quad (2)$$

Подобной формулы в литературе не найдено. В предельном случае, когда  $I > I_{2c}$ , данная формула преобразуется в известную зависимость  $U \sim \exp j$  [7].

ВАХ для поликристаллических ВТСП исследовались во многих работах. Однако до настоящего времени отсутствует единая картина зависимостей напряжения (напряженности электрического поля) от плотности тока, протекающему по образцу. Отсутствует также единый теоретический подход, объясняющий ход ВАХ, особенно для плотностей токов лишь не на много превышающих критическую. Для описания полученных экспериментальных данных предложено несколько зависимостей:

– степенные:

$$E \sim j^n \quad [8],$$

$$E \sim (j - j_c)^n \quad [9];$$

– экспоненциальная:

$$E \sim \exp(j) \quad [7],$$

и другие, описываемые более сложными выражениями (например, [10]).

Универсальность этих соотношений, а также причины различий между ними остаются неясными, поскольку экспериментальные результаты в этих работах были получены в сравнительно узких диапазонах напряжения (напряженности электрического поля), и соответствующих плотностей токов.

Среди этого ряда работ следует выделить работу [11], поскольку она по своей схеме эксперимента наиболее близка к установке (рис. 1).

В силу вышесказанного найденная новая формула представляет особый интерес, так как раскрывает область ВАХ с токами, значительно более близкими к току  $I_{2c}$  по сравнению с известными формулами.

Дадим более подробное физическое объяснение фрагмента кривых намагничивания (см. рис. 4). Все эксперименты с различным составом образцов и колец различных размеров по определению кривой намагничивания

$B_K \left( \frac{dB_C}{dt} \right)$  приводили к характерному ходу кривых. Особенность заключается

в следующем. На участке **0–1** все кривые идут слитно и только после т.  $I$  проходят эквидистантно. Причиной является то, что на участке **0–1** ВТСП-кольцо находится в сверхпроводящем состоянии и подчиняется закону сохранения магнитного потока, на основании которого выводится формула для

участка **0–1**. При этом полностью отсутствует зависимость от скорости магнитного потока. Начиная от т.  $I$  перестает действовать закон сохранения магнитного потока. И ход кривых определяется законом электромагнитной индукции.

В результате проведенных экспериментальных работ одним из их достоинств является то, что в эксперименте наглядно продемонстрировано действие двух законов, описывающих индуктивные токи и диапазоны действия этих законов. При этом показано (для ВТСП-образцов) при токах  $I < I_{2c}$  – это закон сохранения магнитного потока, и для образцов в резистивном (или частично резистивном) состоянии при токах  $I \geq I_{2c}$  – это закон электромагнитной индукции.

### Заключение

Таким образом, из проведенных экспериментальных работ можно сделать некоторые выводы.

1. С помощью бесконтактного измерения критического тока ВТСП кольца строятся кривые намагничивания в зависимости  $B_K(i)$  магнитного поля сверхпроводящего кольца от магнитного поля соленоида  $B_C(i)$ .

Поскольку на вещество кольца отсутствует непосредственное воздействие внешнего магнитного поля, из кривой намагничивания наблюдаем, что кривая магнитного поля кольца  $B_K(i)$  проходит параллельно оси внешнего магнитного поля  $B_C(i)$  (см. рис. 2) и не зависит от скорости изменения магнитного потока, в отличие от аналогичных экспериментов (рис. 3).

2. На начальном участке кривых намагничивания (**0–1**) (см. рис. 2, 4) сверхпроводящий ток в кольце и соответствующее собственное магнитное поле определяются законом сохранения магнитного потока: магнитный поток от собственного поля кольца равен магнитному потоку от внешнего поля кольца с противоположным знаком.

3. После т.  $I$  (см. рис. 2) поток магнитного поля от собственного тока остается постоянным. Это легко объясняется тем, что малейшему увеличению сверхпроводящего тока кольца (для собственного магнитного поля выше критического) соответствует частичная потеря сверхпроводимости и переход в частично резистивное состояние. Именно закону электромагнитной индукции подчиняется ВТСП-образец, достигший критического состояния, поскольку рост тока выше критического возможен только при частично резистивном состоянии.

4. То факт, что ВТСП-кольцо находится в критическом состоянии, подтверждается обнаруженным экспериментально эффектом эквидистантных кривых намагничивания, которые образуются при кратном увеличении тока соленоида, а следовательно, и магнитного потока внешнего поля. Эти эквидистантные кривые (рис. 2) соответствуют росту тока сверхпроводящего кольца выше критического значения, потому что этот добавочный ток является резистивным, так как возникает в результате электромагнитной индукции. Из эквидистантности кривых намагничивания определена зависимость  $I(\epsilon)$ , см (1).

5. Из обнаруженного эффекта эквидистантности кривых намагничивания при различных кратных скоростях увеличения внешнего магнитного поля определена вольт-амперная характеристика ВТСП-кольца (2) для токов больших или равных критическому току  $I_{2c}$ .

#### **Список литературы**

1. **Суворова, Л. А.** Модель процесса перехода поликристаллического высокотемпературного сверхпроводника в критическое состояние / Л. А. Суворова, А. Р. Бувев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2010. – № 3 (15). – С. 102–114.
2. **Бувев, А. Р.** Исследование высокотемпературной сверхпроводимости с помощью нового бесконтактного метода / А. Р. Бувев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Сер. Естественные науки. – 2004. – № 5. – С. 98–104.
3. Пат. Российского агентства по патентам и товарным знакам РФ на изобретение. № 2244317. Способ бесконтактного измерения тока ВТСП и устройство для его реализации / Бувев А. Р. – 02.12.2002, БИ № 1. 2005.
4. Пат. Российского агентства по патентам и товарным знакам РФ на изобретение № 2216805. Соленоид максимального магнитного поля / Бувев А. Р., Игумнов В. Н., Иванов В. В. – 20.11.2003, БИ № 32, 2003.
5. **Polak, M.** Contactless measurement of voltage-current characteristics of high- $T_c$  thin film superconductors / M. Polak, V. Windte, W. Schauer et al. // Physica C. – 1991. – Vol. 174. – P. 14–22.
6. **Буккель, В.** Сверхпроводимость / В. Буккель. – М.: Мир, 1975. – 102 с.
7. **Polak, M.** Magnetic field distribution above a superconducting YBaCuO sample as an indication of sample inhomogeneities / M. Polak, P. Kottman, M. Majoros et al. // Superconductor Science Technology. – 1990. – Vol. 3, № 2. – P. 67–71.
8. **Evetts, J. E.** Relation of critical current irreversibility to trapped flux and microstructure in polycrystalline YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> / J. E. Evetts, B. A. Glowacki // Cryogenics. – 1988. – Vol. 28. – P. 641.
9. **Meszaros, S.** Investigation of the coupling mechanism between superconducting grains in high- $T_c$  superconductors / S. Meszaros, K. Vad, G. Halasz // Physica C. – 1990. – Vol. 167. – P. 139.
10. **Huang, Z. J.** The E-J characteristic of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  in very low dissipation region / Z. J. Huang, Y. Y. Xue, H. H. Feng, C. W. Chu // Physica C. – 1991. – Vol. 184. – P. 371.
11. **Жуков, А. А.** Вольт-амперные характеристики керамического сверхпроводника Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>8+ $\delta$</sub>  / А. А. Жуков, Д. А. Комарков, И. Миркович, В. П. Шабатин, В. В. Палачев // Сверхпроводимость: физика химия техника. – 1993. – Т. 6, № 4. – С. 743–749.

#### **References**

1. Suvorova L. A., Buev A. R. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Physics and mathematics sciences]. 2010, no. 3 (15), pp. 102–114.
2. Buev A. R. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Ser. Estestvennye nauki* [University proceedings. Volga region. Natural sciences]. 2004, no. 5, pp. 98–104.
3. Pat. № 2244317 Russian Federation. *Sposob beskontaktnogo izmereniya toka VTSP i ustroystvo dlya ego realizatsii* [Method of contactless HTSC current change and device of realization thereof]. Buev A. R. 02.12.2002, no. 1, 2005.

4. Pat. №2216805 Russian Federation. *Solenoid maksimal'nogo magnitnogo polya* [Solenoid of the maximum magnetic field]. Buev A. R., Igumnov V. N., Ivanov V. V. 20.11.2003, no. 32, 2003.
5. Polak M., Windte V., Schauer W., et al. *Physica C*. 1991, vol. 174, pp. 14–22.
6. Bukkel' V. *Sverkhprovodimost'* [Super conductivity]. Moscow: Mir, 1975, 102 p.
7. Polak M., Kottman P., Majoros M., et al. *Superconductor Science Technology*. 1990, vol. 3, no 2, pp. 67–71.
8. Evetts J. E., Glovacki B. A. *Cryogenics*. 1988, vol. 28, p. 641.
9. Meszaros S., Vad K., Halasz G. *Physica C*. 1990, vol. 167, p. 139.
10. Huang Z. J., Xue Y. Y., Feng H. H., Chu C. W. *Physica C*. 1991, vol. 184, p. 371.
11. Zhukov A. A., Komarkov D. A., Mirkovich I., Shabatin V. P., Palachev V. V. *Sverkhprovodimost': fizika khimiya tekhnika* [Superconductivity: physics, chemistry, technology]. 1993, vol. 6, no. 4, pp. 743–749.

---

**Суворова Людмила Алексеевна**

аспирант, Марийский государственный университет (г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1)

E-mail: suv87L@mail.ru

**Suvorova Lyudmila Alekseevna**

Postgraduate student, Mari State University (Yoshkar-Ola, 1 Lenina square)

**Бувей Андрей Романович**

доктор технических наук, профессор, кафедра теоретической и прикладной физики, Марийский государственный университет (г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1)

E-mail: suv87L@mail.ru

**Buev Andrey Romanovich**

Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of theoretical and applied physics, Mari State University (Yoshkar-Ola, 1 Lenina square)

---

УДК 538.945

**Суворова, Л. А.**

**Применение закона сохранения магнитного потока в исследовании критического состояния образца высокотемпературного сверхпроводника кольцевой формы / Л. А. Суворова, А. Р. Бувей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 188–197.**