
ХИМИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF INORGANIC MATERIALS

ISSN 2410-6593 (Print), ISSN 2686-7575 (Online)

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-2-184-191>



УДК 538.945

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

О коэффициенте прохождения сверхпроводящей частицы

А.В. Матасов[@], А.А. Довмалов, Д.М. Бабышкина

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250 Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: matasov_av93@mail.ru

Аннотация

Цели. Общая теория сверхпроводимости, способная полностью описать данное явление, отсутствует, что накладывает свои трудности в поиске новых сверхпроводящих материалов и исследовании их свойств. В частности, неисследованной является электродинамика сверхпроводящей системы. С целью возможного дальнейшего описания электродинамики сверхпроводников в работе рассматриваются температурные зависимости энергетических параметров куперовской пары в потенциальном поле вихря Абрикосова.

Методы. Основой для полученных результатов работы являлось рассмотрение коэффициента прохождения сверхпроводящей частицы в приближении метода Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна, а также связь критической температуры с лондоновской глубиной проникновения и длиной когерентности на основе модели плазмонного разрушения сверхпроводящего состояния.

Результаты. Получены зависимости времени жизни частицы в потенциальной яме, глубины проникновения, частоты ударов частицы о потенциальный барьер, размытости энергетического уровня, коэффициента прохождения, потенциальной, кинетической энергии частицы от температуры. Получены характерные значения данных параметров при абсолютном нуле для различных купратных, органических и других сверхпроводящих материалов. Получены зависимости критического электрического потенциала от температуры, лондоновской глубины проникновения, длины когерентности; электрического потенциала от коэффициента прохождения при разных значениях температуры. Вид зависимостей качественно соответствует экспериментальным данным.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы для построения общей теории сверхпроводимости, описании электродинамики сверхпроводящего состояния, разработки новых сверхпроводников, обладающих более высокими значениями критических токов.

Ключевые слова: теория сверхпроводимости, куперовская пара, вихрь Абрикосова, электродинамика сверхпроводников

Для цитирования: Матасов А.В., Довмалов А.А., Бабышкина Д.М. О коэффициенте прохождения сверхпроводящей частицы. *Тонкие химические технологии*. 2021;16(2):184–191. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-2-184-191>

RESEARCH ARTICLE

Transmission coefficients of superconducting particles

Anton V. Matasov[@], Armen A. Dovmalov, Daria M. Babyshkina

National Research University MPEI, Moscow, 111250 Russia

[@]Corresponding author, e-mail: matasov_av93@mail.ru**Abstract**

Objectives. There is no general theory of superconductivity capable of fully describing this phenomenon, which imposes its own difficulties in the search for new superconducting materials, as well as in the study of their properties. In particular, the electrodynamics of a superconducting system is unexplored. With the aim of a possible further description of the electrodynamics of superconductors, the temperature dependences of the energy parameters of a Cooper pair in the potential field of Abrikosov vortex were analyzed.

Methods. The basis for the obtained results of the work was the consideration of the transmission coefficient for a superconducting particle in the approximation of the Wentzel–Kramers–Brillouin method, as well as the relationship between the critical temperature and the London penetration depth and the coherence length based on the model of plasmon destruction of the superconducting state.

Results. The dependences of the lifetime of a particle in a potential well, penetration depth, frequency of impacts of a particle against a potential barrier, blurring of the energy level, transmission coefficient, and potential and kinetic energy of a particle on temperature were obtained. The characteristic values of these parameters were obtained at absolute zero for various cuprate, organic, and other superconducting materials. The dependences of the critical electric potential on temperature, as well as the London penetration depth, coherence length, and electric potential on the transmission coefficient at different temperatures were obtained. The form of the dependences qualitatively corresponds to the experimental data.

Conclusions. The results obtained can be used to construct a general theory of superconductivity, describe the electrodynamics of a superconducting state, and develop new superconductors with higher critical currents.

Keywords: theory of superconductivity, Cooper pair, Abrikosov vortex, electrodynamics of superconductors

For citation: Matasov A.V., Dovmalov A.A., Babyshkina D.M. Transmission coefficients of superconducting particles. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2021;16(2):184–191 (Russ., Eng.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-2-184-191>

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с работ Абрикосова [1] и открытия вихрей Абрикосова, электродинамика сверхпроводящего состояния в основном описывается через движение вихревой решетки [2]. Как правило рассматриваются механические модели движения, которые учитывают силы вязкого трения, пиннинга вихрей, сил, деформирующих решетку. Часто данный подход не учитывает квантовую природу вихря Абрикосова и явления сверхпроводимости. В качестве другого встречающегося подхода описания динамики сверхпроводящего состояния можно выделить солитонную теорию сверхпроводимости [3]. Данный подход требует рассмотрения нелинейных возбуждений,

что зачастую приводит к трудности в получении точного решения. Теория солитонов позволяет описать некоторые дифференциальные характеристики купратных сверхпроводников и не является общей для всех сверхпроводящих материалов.

В виду отсутствия общей теории электродинамики сверхпроводящего состояния трудно дать общее теоретическое описание вольтамперной характеристики большинства сверхпроводящих соединений, которое является крайне важным для широкого применения сверхпроводящих материалов.

В настоящей работе проанализирована модель движения куперовской пары в вихре Абрикосова. Данная задача уже рассматривалась в работе [4] в рамках оценки связи между длиной когерентности

и лондоновской глубиной проникновения, а также решения одномерного уравнения Шредингера, что является важным результатом для построения общей теории сверхпроводимости и электродинамики сверхпроводящего состояния. В настоящей работе исследованы зависимости различных энергетических параметров сверхпроводящей частицы от температуры, включая коэффициент прохождения, на основе которого получена качественная модель, описывающая вольтамперную характеристику сверхпроводников.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КУПЕРОВСКОЙ ПАРЫ В ПОТЕНЦИАЛЬНОМ ПОЛЕ ВИХРЯ АБРИКОСОВА

Произведем оценку зависимости коэффициента прохождения сверхпроводящей частицы D через потенциальный барьер вихря Абрикосова U . Областью вихря Абрикосова, на которой возможно эффективное рассеяние энергии сверхпроводящей частицы, является несверхпроводящая внутренняя цилиндрическая область вихря. Во внутренней области считается, что энергия вихря Абрикосова постоянна в пределе $\xi \ll \lambda$, где ξ – длина когерентности, представляющая собой характерный размер куперовской пары, λ – лондоновская глубина проникновения, представляющая собой характерный размер проникновения внешнего магнитного поля в сверхпроводник. [5]. Тогда, используя квазиклассическое приближение Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна [6], можно получить следующее выражение для коэффициента прохождения:

$$D(T) = \frac{e^{-4\xi(T)\sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(U(T)-E(T))}}}{(1 + 0.25e^{-4\xi(T)\sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(U(T)-E(T))}})^2}, \quad (1)$$

где m – масса куперовской пары (в работе удвоенная масса электрона), $\hbar$ – постоянная Дирака, E – энергия куперовской пары.

Потенциальная энергия представляет собой энергию вихря Абрикосова и в общем случае выражается через функцию Бесселя K_0 [5]. Часто данную энергию нормируют на некоторую единицу длины. В данной работе в качестве единицы длины использовалась длина когерентности.

$$U(T) = \frac{\Phi_0^2 \xi(E)}{4\pi\mu_0 \lambda(T)^2} K_0\left(\frac{\xi(T)}{\lambda(T)}\right), \quad (2)$$

где Φ_0 – квант магнитного потока, μ_0 – магнитная постоянная, λ – лондоновская глубина проникновения.

Энергию сверхпроводящей частицы по аналогии с энергетической щелью можно выразить как $E = 2kT_c$, где T_c – критическая температура, т.е. температура перехода материала в сверхпроводящее состояние. Ввиду того, что в работе [7] была получена связь критической температуры с лондоновской глубиной проникновения и длиной когерентности, выразим энергию частицы через данные характерные длины:

$$E(T) = \hbar c / \lambda(T) \sqrt{\frac{4\pi\alpha\xi(T)}{\lambda(T)}}, \quad (3)$$

где c – скорость света, α – постоянная тонкой структуры.

Зависимости измеренных ξ , λ от температуры определяем стандартными выражениями:

$$\xi(T) = \frac{\xi(0)}{\sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4}}, \quad (4)$$

$$\lambda(T) = \frac{\lambda(0)}{\sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4}}, \quad (5)$$

Построим зависимости энергий и коэффициента прохождения от температуры для сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ при $\lambda(0) = 180$ нм, $\xi(0) = 0.4$ нм, $T_c = 90.8$ К [8] (рис. 1, 2).

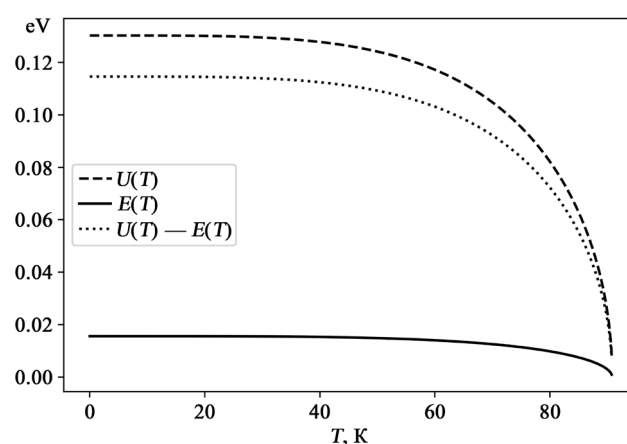


Рис. 1. Зависимость потенциальной U , кинетической E , разницы энергий от температуры для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.
Fig. 1. Dependence of the potential, U , and kinetic, E , energies and the energy difference on temperature for $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

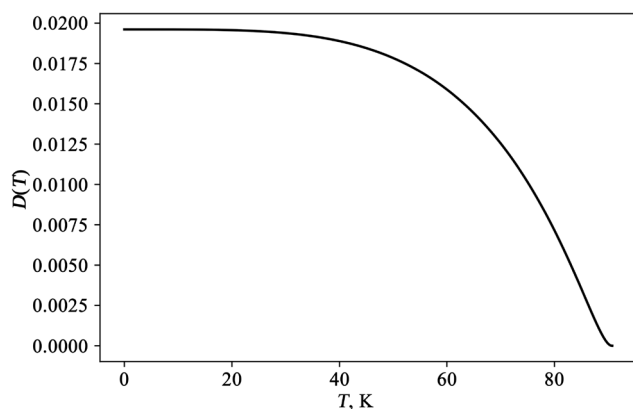


Рис. 2. Зависимость коэффициента прохождения от температуры для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

Fig. 2. Dependence of the transmission coefficient on temperature for $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

На основе полученного коэффициента прохождения получим зависимость частоты ударов частицы о барьер n , времени жизни частицы в яме t глубины проникновения под потенциальный барьер L , размытости энергетического уровня от температуры T [6]:

$$n(T) = \frac{1}{4\lambda(T)} \sqrt{\frac{2E(T)}{m}} \quad (6)$$

$$t(T) = \frac{1}{n(T)D(T)} \quad (7)$$

$$L(T) = \frac{\hbar}{2\sqrt{2m(U(T) - E(T))}} \quad (8)$$

$$\Delta E(T) = \hbar / t(T) \quad (9)$$

Установлено, что потенциальная, кинетическая энергия частицы, коэффициент прохождения, количество столкновений в единицу времени и размытость энергетической щели уменьшаются с ростом температуры. Глубина проникновения и время жизни куперовской пары в несверхпроводящей области вихря увеличиваются с ростом температуры.

Рассчитаем характерные значения величин (1)–(3), (6), (8), (9) для купратных, органических и некоторых других сверхпроводников второго рода при $T = 0$ К (табл. 1). Для анализа были выбраны материалы, для которых подтверждена справедливость выражения (3) посредством соответствия расчетных T_c^* и экспериментальных критических температур T_c (табл. 2).

На основе полученной зависимости коэффициента прохождения куперовской пары от температуры построим качественную модель описания вольтамперной характеристики сверхпроводников.

Положим в первом приближении, что энергия вихря Абрикосова не зависит от внешнего приложенного электрического поля. Добавим к энергии

Таблица 1. Характерные значения энергетических параметров некоторых сверхпроводников при $T = 0$ К

Table 1. Typical values of the energy parameters of some superconductors at $T = 0$ К

Материал Material	$D(0)$	$U(0)$, eV	$E(0)$, eV	$n(0)$, s^{-1}	$L(0)$, m	$\Delta E(0)$, eV
$\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}$	0.021	0.042	5.606×10^{-3}	1.827×10^{10}	3.623×10^{-10}	1.567×10^{-6}
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	0.02	0.13	0.016	7.29×10^{10}	2.04×10^{-10}	5.909×10^{-6}
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+x}$	1.55×10^{-3}	0.025	3.234×10^{-3}	7.457×10^9	4.638×10^{-10}	4.779×10^{-8}
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$	2.636×10^{-11}	0.193	0.016	4.459×10^{10}	1.642×10^{-10}	4.86×10^{-15}
$\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+x}$	9.739×10^{-7}	0.175	0.016	5.325×10^{10}	1.734×10^{-10}	2.144×10^{-10}
$\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+x}$	1.242×10^{-12}	0.336	0.027	8.337×10^{10}	1.24×10^{-10}	4.281×10^{-16}
$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$	6.248×10^{-11}	0.318	0.026	8.437×10^{10}	1.277×10^{-10}	2.18×10^{-14}
$\kappa\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu(NCS)}_2$	0.108	0.011	1.794×10^{-3}	4.623×10^9	7.366×10^{-10}	2.059×10^{-6}
$(\text{BEDT-TTF})_2\text{Cu[N(CN)}_2\text{]Br}$	0.233	0.01	1.928×10^{-3}	5.883×10^9	7.534×10^{-10}	5.674×10^{-6}
$\beta_L\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{I}_3$	0.088	2.098×10^{-3}	4.08×10^{-4}	6.055×10^8	1.68×10^{-9}	2.21×10^{-7}
$\beta\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{I}_2\text{Br}_2$	1.164×10^{-64}	0.014	1.121×10^{-3}	7.025×10^8	5.978×10^{-10}	3.382×10^{-70}
$\beta\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Au}_2$	8.041×10^{-23}	0.011	1.002×10^{-3}	8.302×10^8	7.076×10^{-10}	2.760×10^{-28}
CNT(5,0)	1.139×10^{-13}	0.027	2.59×10^{-3}	3.513×10^9	4.429×10^{-10}	1.654×10^{-18}
NbSe_2	5.705×10^{-4}	0.012	1.626×10^{-3}	2.82×10^9	6.695×10^{-10}	6.653×10^{-9}
$\text{H}_2\text{S}(155 \text{ ГПа}) / \text{H}_2\text{S}(155 \text{ НПа})$	1.471×10^{-18}	0.468	0.034	1.019×10^{11}	1.047×10^{-10}	6.200×10^{-22}

Примечание: BEDT-TTF – бис(этилендитио)тетрафлуорален. CNT(5,0) – углеродная нанотрубка хиральностью (5,0).
Note: BEDT-TTF is bis(ethylenedithio)tetrathiafulvalen and CNT(5,0) is a carbon nanotube with a chirality of (5,0).

Таблица 2. Сравнение расчетных (T_c^*) и экспериментальных (T_c) критических температур некоторых сверхпроводниковTable 2. Comparison of the calculated (T_c^*) and experimental (T_c) critical temperatures of various superconductors

Материал Material	ξ , нм ξ , nm	λ , нм λ , nm	T_c^* , К	T_c , К	Ссылка Reference
$\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}$	0.7	430	32.5	34	[8]
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	0.4	180	90.8	92.4	[8]
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+x}$	1.5	800	18.8	13	[9]
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$	2	200–300 при 300 / at 300	94.3	94	[9]
$\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+x}$	1.2	200–450 при 252 / at 252	94.9	95	[9]
$\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+x}$	1.7	205	154	127	[9]
$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$	1.5	130–200 при 200 / at 200	150	135	[9]
$\kappa\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu(NCS)}_2$	0.8	500–2000 при 961 / at 961	10.41	10.4	[9]
$(\text{BEDT-TTF})_2\text{Cu[N(CN)}_2\text{]Br}$	0.5–1.2 при 0.5 / at 0.5	550–1500 при 783 / at 783	11.19	11.2	[9]
$\beta_{\text{L}}\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{I}_3$	2	3500	2.37	1.5	[9]
$\beta\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Br}_2$	44–46 при 44 / at 44	4000–5000 при 5000 / at 5000	6.5	2.2	[9]
$\beta\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Au}_2$	18–25 при 18 / at 18	4000	5.81	4.2	[9]
CNT(5,0)	6.6–12 при 6.6 / at 6.6	1430–1570 при 1520 / at 1520	15.03	15	[10]
NbSe_2	2.5	1500	9.44	7	[9]
$\text{H}_2\text{S}(155 \text{ ГПа}) / \text{H}_2\text{S}(155 \text{ НПа})$	2.15	189	195.56	190–203	[11]

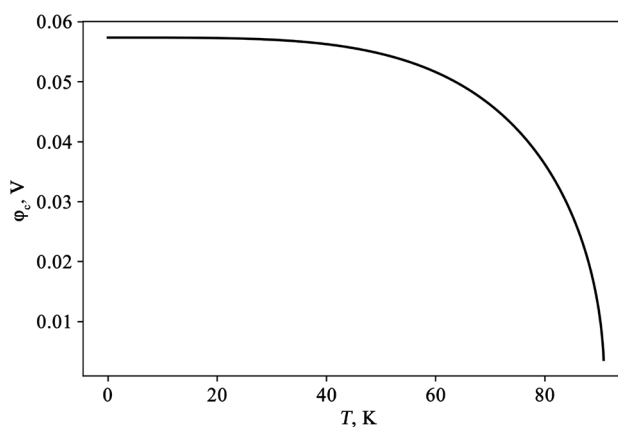
частицы E зависимость от приложенного потенциала ϕ следующим образом: $E(T, \phi) = E(T) + 2q\phi$, q – заряд электрона.

Тогда критический электрический потенциал определяется как: $\phi_c = (U - E)/2q$ (рис. 3). Также определим зависимость критического потенциала от характерных длин, определяющих сверхпроводящее состояние (рис. 4).

Зависимость электрического потенциала от коэффициента прохождения при различных температурах представлена на рис. 5, что физически представляет собой качественное описание вольтамперной характеристики сверхпроводников.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отметим, что полученные зависимости различных энергетических параметров сверхпроводящих материалов главным образом выражаются через характерные длины, определяющие сверхпроводящее состояние, лондоновскую глубину проникновения и длину когерентности. Определение коэффициента прохождения получается исходя из зависимостей характерных длин от температуры, что в общем

Рис. 3. Зависимость значения критического электрического потенциала (ϕ_c) от температуры для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.Fig. 3. Dependence of the critical electric potential (ϕ_c) value on temperature for $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

случае не описывается уравнениями вида (4) и (5) [12] и требует отдельного рассмотрения для конкретного сверхпроводящего материала.

Установлено, что рассмотренная зависимость энергии частицы от температуры имеет схожий вид с зависимостью энергетической щели от температуры.

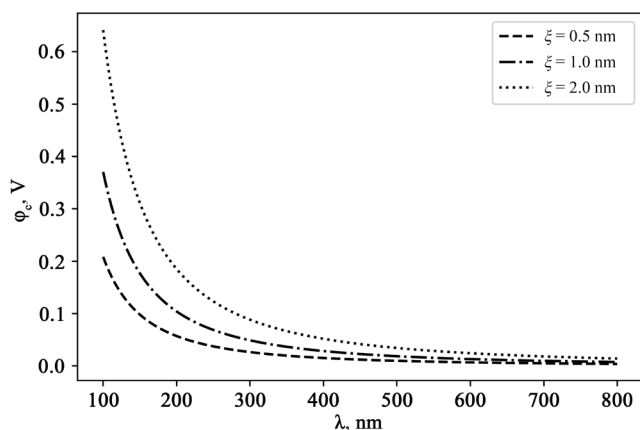


Рис. 4. Зависимость значения критического электрического потенциала (ϕ_c) от лондоновской глубины проникновения при некоторых фиксированных длинах когерентности.

Fig. 4. Dependence of the value of the critical electric potential (ϕ_c) on the London depth of penetration for various fixed coherence lengths.

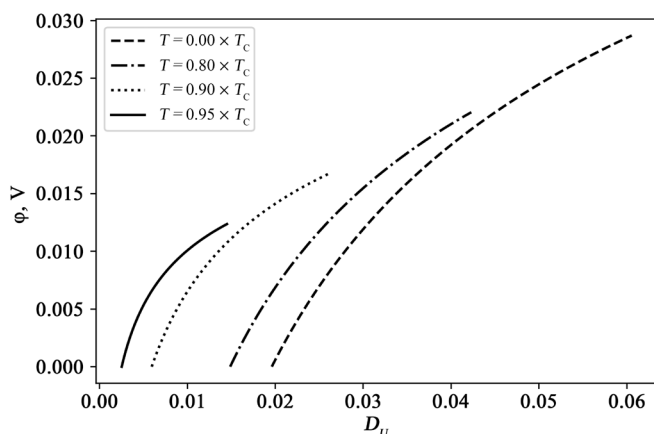


Рис. 5. Зависимость электрического потенциала от коэффициента прохождения при различных температурах для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

Fig. 5. Dependence of the electric potential on the transmission coefficient at different temperatures for $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

По полученным характерным значениям энергетических параметров табл. 2 можно заключить, что из материалов значительно выбиваются некоторые органические материалы с большими значениями лондоновской глубины проникновения, а также H_2S . Данные органические материалы менее точно описываются выражением для критической температуры, приведенным в [7], что может указывать на рассмотрение эффективных характерных длин для более лучшего соответствия экспериментальной критической температуры. Полученные значения для H_2S могут указывать на то, что для проявления сверхпроводящих свойств при температурах близких к комнатным требуется увеличить энергию вихря Абрикосова.

Ввиду того, что коэффициент прохождения прямо пропорционален туннельному току, полученная зависимость $\phi(D)$ (рис. 5) имеет прямую связь с вольтамперной характеристикой сверхпроводящих материалов и, как можно заметить, имеет вид схожий с экспериментальными измерениями в данной области, например, [13, 14].

В данной работе зависимость от электрического потенциала ϕ дана посредством добавления кинетической энергии, требуемой для ускорения частиц. Но, по-видимому, требуется определять все зависимости от внешних факторов для параметров сверхпроводящего материала через зависимости лондоновской глубины проникновения и длины когерентности для более точной модели. Несмотря на это, полученная зависимость критического потенциала от температуры имеет вид, способный описывать экспериментальные данные, и легко сводится к традиционной линейной зависимости критического тока от температуры в области фазового перехода теории Бардина-Купера-Шриффера [15] и экспериментальным степенным приближениям. Критический электрический потенциал также, как и кинетическая энергия сверхпроводящей частицы и критическая температура, увеличивается с ростом длины когерентности и уменьшается с ростом лондоновской глубины проникновения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены зависимости различных энергетических параметров от температуры. В частности, полученная зависимость коэффициента прохождения может использоваться в дальнейшем для построения общей теории электродинамики сверхпроводников.

Характерные значения энергетических параметров могут использоваться в дальнейшем для оценки фундаментальных и прикладных свойств, связанных с механизмами сверхпроводимости.

Полученные зависимости критического электрического потенциала от температуры, потенциала от коэффициента прохождения качественно повторяют экспериментальные измерения и могут использоваться для построения теории сверхпроводимости и разработке новых тоководных устройств на основе сверхпроводников. Для построения более точной модели вольтамперной характеристики в дальнейшем следует рассматривать зависимость характерных длин от электрического потенциала.

Вклад авторов

Вклад каждого из авторов заключался в совместной постановке задач, их решении и обсуждении результатов. Авторами внесен равный вклад в расчетную часть работы,

подготовку статьи к публикации и применение программного обеспечения для создания визуализации полученных зависимостей.

Authors' contribution

The contribution of each of the authors was to jointly set tasks, solve them, and discuss the results. The authors made

an equal contribution to the calculation part of the work, the preparation of the article for publication, and the use of software to create a visualization of the obtained dependencies.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Abrikosov A.A. The magnetic properties of superconducting alloys. *J. Phys. Chem. Solids*. 1957;2(3):199–208. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(57\)90083-5](https://doi.org/10.1016/0022-3697(57)90083-5)
2. Matsushita T. *Flux Pinning in Superconductors*. Part of the Springer Series in Solid-State Sciences book series. V. 178. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2014. 475 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-45312-0>
3. Mourachkine A. *High-Temperature Superconductivity in Cuprates. The Nonlinear Mechanism and Tunneling Measurements*. Part of the Fundamental Theories of Physics book series. V. 125. Kluwer Academic Publishers; 2002. 317 p. <https://doi.org/10.1007/0-306-48063-8>
4. Matasov A.V., Cherkasov A.P., Kholodny D.S. and Mikhaylov I.A. Cooper Pair in the Potential Field of Abrikosov Vortex. In: *2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. Moscow, Russia; 2020. 4 p. <https://doi.org/10.1109/REEPE49198.2020.9059113>
5. Schmidt V.V., Müller P., Ustinov A.V. *The Physics of Superconductors: Introduction to Fundamentals and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 1997. 207 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03501-6>
6. Davydov A.S. *Quantum Mechanics*. 2nd ed. Oxford, New York: Pergamon Press; 1976. 637 p.
7. Matasov A.V. Prediction of the critical temperature of unconventional superconductors based on the plasmon mechanism. In: *AIP Conference Proceedings*. 2019;2163(1):020005. <https://doi.org/10.1063/1.5130084>
8. Ципенюк Ю.М. *Физические основы сверхпроводимости*. М.: Изд-во МФТИ: Физматкнига; 2003; 158 с. ISBN 5-89155-099-7

Об авторах:

Матасов Антон Владимирович, аспирант кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов Института электротехники и электрификации ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14). E-mail: matasov_av93@mail.ru. Scopus Author ID 57208886094, ResearcherID Q-9794-2017, <https://orcid.org/0000-0001-6092-5089>

Довмалов Армен Арменович, студент кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов Института электротехники и электрификации ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14). E-mail: armenbbb80821@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-4285-7876>

Бабышкина Дарья Максимовна, студент кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов Института электротехники и электрификации ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14). E-mail: dashababyshkina@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-7893-5525>

[Tsipenyuk Yu.M. *Fizicheskie osnovy sverkhprovodimosti (Physical foundations of superconductivity)*. Moscow: MIPT Publishing House: Fizmatkniга; 2003; 158 p. ISBN 5-89155-099-7]

9. Kleiner R., Buckel W. *Superconductivity: An Introduction*. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH and Co; 2016. 496 p.

10. Wang Z., Shi W., Lortz R., Sheng P. Superconductivity in 4-Angstrom carbon nanotubes – a short review. *Nanoscale*. 2012;4(1):21–41. <https://doi.org/10.1039/C1NR10817D>

11. Talantsev E.F., Crump W.P., Tallon J.L. Universal scaling of the self-field critical current in superconductors: from sub-nanometre to millimetre size. *Sci. Rep.* 2017;7(1):10010. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10226-z>

12. Prozorov R., Giannetta R.W. TOPICAL REVIEW: Magnetic penetration depth in unconventional superconductors. *Supercond. Sci. Technol.* 2006;19(8):R41–R67. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/19/8/R01>

13. Ozkan H., Topal U., Gasanly N.M., Albiss B., Kaye T. Voltage-current characteristics of the thallium-based ceramic superconductors. *Supercond. Sci. Technol.* 1999;12(9):592. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/12/9/303>

14. Sun Y., Zhao W., Wang J. *et al.* Voltage-current properties of superconducting amorphous tungsten nanostrips. *Sci. Rep.* 2013;3:2307. <https://doi.org/10.1038/srep02307>

15. Original Article. Ambegaokar V., Baratoff A. Tunneling Between Superconductors. *Phys. Rev. Lett.* 1963;10(11):486. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.10.486>

Erratum. Ambegaokar V., Baratoff A. Tunneling Between Superconductors. *Phys. Rev. Lett.* 1963;11(2):104. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.11.104>

About the authors:

Anton V. Matasov, Postgraduate Student, Department of Physics and Technology of Electrotechnical Materials and Components, Institute of Electrical Engineering and Electrification, National Research University MPEI (14, Krasnokazarmennaya ul, Moscow, 111250, Russia). E-mail: matasov_av93@mail.ru. Scopus Author ID 57208886094, ResearcherID Q-9794-2017, <https://orcid.org/0000-0001-6092-5089>

Armen A. Dovmalov, Student, Department of Physics and Technology of Electrotechnical Materials and Components, Institute of Electrical Engineering and Electrification, National Research University MPEI (14, Krasnokazarmennaya ul., Moscow, 111250, Russia). E-mail: armenbbb80821@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-4285-7876>

Daria M. Babyshkina, Student, Department of Physics and Technology of Electrotechnical Materials and Components, Institute of Electrical Engineering and Electrification, National Research University MPEI (14, Krasnokazarmennaya ul., Moscow, 111250, Russia). E-mail: dashababyshkina@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-7893-5525>

*Поступила: 25.11.2020; получена после доработки: 02.02.2021; принята к опубликованию: 31.03.2021.
The article was submitted: November 25, 2020; approved after reviewing: February 02, 2021; accepted for publication: March 31, 2021.*