

# ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ОТКЛИК ПОВЕРХНОСТНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В КРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ

*В. А. Березин<sup>\*</sup>, В. А. Тулин<sup>\*\*</sup>*

*Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук  
142432, Черноголовка, Московская обл., Россия*

Поступила в редакцию 24 мая 2016 г.,  
после переработки 9 июня 2017 г.

Изучено влияние скорости изменения магнитного поля на высокочастотное (ВЧ) поглощение поверхностной сверхпроводимости цилиндрических образцов. Показано, что величина дополнительного ВЧ-поглощения, связанная с вихрями Кулика, не обнаруживает признаков насыщения и других критических изменений вплоть до скоростей изменения магнитного поля 350 кЭ/с, что указывает на большую скорость движения вихрей Кулика по сравнению с вихрями Абрикосова. Обсуждается влияние нормальной сердцевины образца на динамику магнитного потока.

DOI: 10.7868/S0044451017110074

В сверхпроводящих материалах с небольшим значением параметра Гинзбурга–Ландау  $\kappa$  ( $\kappa = \xi/\lambda$ , где  $\xi$  и  $\lambda$  — длина когерентности и лондоновская глубина проникновения магнитного поля), превышающим 0.417, в магнитном поле, большем критического для объема (термодинамического критического поля  $H_c$  для сверхпроводников первого рода и второго критического поля  $H_{c2}$  для сверхпроводников второго рода), на поверхности остается тонкая сверхпроводящая прослойка толщиной порядка длины когерентности  $\xi$ . В магнитном поле, параллельном поверхности сверхпроводящего образца, эта прослойка сохраняется до поля  $H_{c3} = 1.695H_{c2}$  [1]. Для образцов в форме цилиндра в магнитном поле, параллельном его оси, образуется замкнутая сверхпроводящая оболочка, аналогичная тонкостенной сверхпроводящей трубке. В 1960-е, 1970-е годы поведение сверхпроводящих образцов в магнитном поле  $H_{c2} < H < H_{c3}$  широко изучалось как теоретически, так и экспериментально [2]. В экспериментальных исследованиях было показано, что для макроскопических образцов наблюдается метастабильное состояние с устойчивым сверхпроводя-

щим током (с отличным от нуля магнитным моментом) в области  $H_{c2} < H < H_{c3}$ , которое существует достаточно длительное время, так что можно ввести понятие критического тока. Изучению критического тока поверхностной сверхпроводимости и связанного с ним критического состояния был посвящен ряд работ [3–6].

Многие физические свойства этого объекта исследуются в медленно меняющемся магнитном поле в диапазоне  $H_{c2} < H < H_{c3}$ . При этом поверхностная оболочка вынужденно находится в критическом состоянии, т.е. исследуются свойства оболочки в критическом состоянии. Если же измерения выполняются в постоянном магнитном поле, то без применения определенных мер свойства оболочки будут зависеть от магнитной предыстории. На самом деле, изменения свойств, связанных с существованием критического состояния, малы по сравнению с полномасштабными изменениями в диапазоне  $H_{c2} < H < H_{c3}$ , но при определенных условиях эти изменения хорошо наблюдаются и за ними стоят определенные физические явления, представляющие интерес.

В случае поверхностной сверхпроводимости (в состоянии равновесия) незатухающие токи не могут экранировать магнитное поле внутри образца. Суммарный ток в сверхпроводящей оболочке дол-

<sup>\*</sup> E-mail: berezin@iptm.ru

<sup>\*\*</sup> E-mail: tulin@iptm.ru

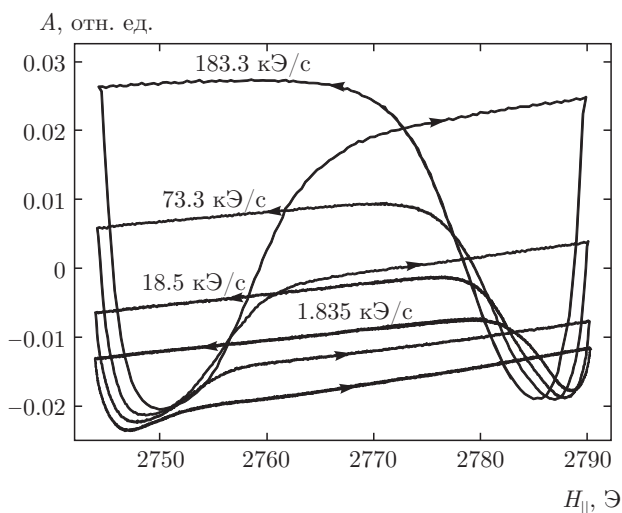
жен быть равен нулю, что энергетически выгодно [7]. Но во временных рамках эксперимента условие равновесия не выполняется, экранирующий ток не затухает и экранирует магнитное поле внутри оболочки. Наличие этого незатухающего тока и вихрей Кулика [8], пронизывающих сверхпроводящую оболочку, позволяет ввести понятие критического состояния (по аналогии с объемными сверхпроводниками второго рода) и определить динамику магнитного потока при приложении меняющегося во времени магнитного поля.

В эксперименте с поверхностной сверхпроводимостью всегда где-то имеется локальная перпендикулярная поверхности составляющая магнитного поля, связанная как с неидеальностью поверхности, так и с конечными размерами образца [9]. В результате наличия этой перпендикулярной составляющей возможно возникновение вихрей Кулика [8] в сверхпроводящем поверхностном слое. Влияние дефектов поверхности на величину критического тока в объемных образцах во всем диапазоне магнитных полей вплоть до  $H_{c3}$  было продемонстрировано в работах [10, 11]. Это влияние в области существования поверхностной сверхпроводимости связывалось авторами с пиннингом вихрей Кулика на дефектах вблизи поверхности.

В предыдущих наших работах [12, 13] изучалось поведение высокочастотного (ВЧ) поглощения электромагнитного поля в области существования поверхностной сверхпроводимости в магнитном поле, содержащем две временные компоненты, параллельные оси цилиндрического образца, постоянную и периодическую низкочастотную небольшой амплитуды (модуляция). Там было обнаружено, что модуляционное магнитное поле оказывает значительное влияние на ВЧ-поглощение. При циклически изменяющемся магнитном поле вокруг фиксированного значения зависимость ВЧ-поглощения поверхностной сверхпроводимости имеет характерную форму — гистерезисный характер с минимумами поглощения после изменения направления развертки магнитного поля. Объяснение полученных результатов было дано в рамках модели, учитывающей влияние протекающих в поверхностном сверхпроводящем слое экранирующих токов на параметр порядка, а также потерь, связанных с движением вихрей Кулика (с двумерным аналогом сопротивления течения магнитного потока). Данная модель позволила объяснить характерную форму гистерезиса, но за рамками рассмотрения остались наблюдаемые в эксперименте переходные процессы и влияние скорости изменения внешнего магнитного поля

на форму гистерезиса. В рамках нашей модели скачок магнитной индукции в направлении, перпендикулярном поверхности цилиндра, определяется движением вихрей Кулика вдоль поверхности, параллельно оси цилиндрического образца. Прохождение одного вихря вдоль поверхности цилиндра меняет поток внутри образца на величину кванта потока  $\Phi_0$ . Поддержание определенной величины скачка индукции определяется произведением плотности вихрей Кулика и их скорости. Концентрация вихрей пропорциональна темпу их генерации вблизи края сверхпроводящей оболочки (в нашем случае где-то у торцов цилиндра), т. е. скорости изменения магнитной индукции. Поскольку концентрация вихрей (в нашем случае — Кулика) величина ограниченная, т. е. не может быть больше  $1/\pi\xi^2$ , при какой-то скорости изменения магнитного поля предложенный механизм не сможет обеспечить необходимую величину скачка индукции на поверхности. Изучение релаксационных характеристик и временных зависимостей ВЧ-поглощения в области существования критического состояния поверхностной сверхпроводимости при наличии переменной составляющей магнитного поля стало целью настоящей работы.

Исследование поверхностного сверхпроводящего состояния осуществлялось с помощью измерения вещественной части высокочастотного импеданса. Величина импеданса сверхпроводников в области поверхностной сверхпроводимости определяется импедансом нормального состояния (для наших образцов глубина проникновения магнитного поля  $\lambda$  больше или порядка длины когерентности  $\xi$ ) и параметром порядка, который, в свою очередь, зависит от величины магнитного поля и температуры. Но основной фактор, влияющий на величину импеданса в этих измерениях, — это сопротивление течения потока, определяемое количеством вихрей Кулика [14]. Измерения проводились на малых мощностях электромагнитного поля, на частотах в диапазоне от 300 до 700 МГц. Влияние ВЧ-поля на состояние сверхпроводника было пренебрежимо малым. Основные измерения проводились на образцах цилиндрической формы (диаметр примерно 5 мм и длина примерно 25 мм), изготовленных из сплава свинец-индий. Вокруг центральной части образца соосно располагался спиральный резонатор, ВЧ-свойства которого измерялись по схеме проходного спектрометра. Внешнее магнитное поле создавалось электромагнитом, а модуляционное магнитное поле — с помощью дополнительной катушки, соосной с образцом. Направление магнитного поля выставлялось параллельно



**Рис. 1.** Полевая зависимость ВЧ-поглощения образца, изготовленного из сплава PbIn, для различных скоростей циклически изменяющегося магнитного поля при температуре 4.2 К

оси образца. Для изучения зависимостей ВЧ-поглощения от скорости изменения магнитного поля мы использовали временную развертку тока, подаваемого на модуляционную катушку. Магнитное поле вблизи поверхности образца складывалось из магнитного поля этой катушки и магнитного поля электромагнита. Из-за малости сигналов использовалось накопление сигнала за большое количество периодов с последующим усреднением. Подробнее методика измерений описана в работе [13].

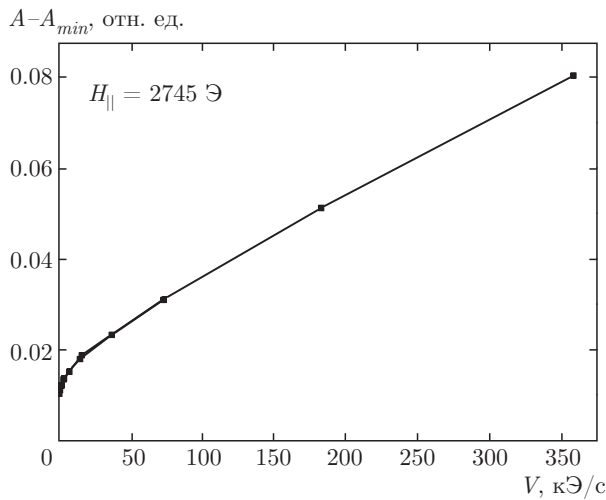
На рис. 1 представлены зависимости ВЧ-поглощения образца PbIn от величины магнитного поля при различных скоростях изменения магнитного поля. Использовалась пилообразная форма модуляционного магнитного поля, так что модуль скорости его изменения был постоянным, за исключением точек разворота.

Для компенсации медленного изменения уровня ВЧ-поглощения из-за дрейфа температуры, величины магнитного поля и параметров измерительной установки проводилось измерение величины ВЧ-поглощения и величины магнитного поля во время цикла изменения магнитного поля. Цикл состоял из временных участков с различной скоростью изменения магнитного поля. Во время цикла дрейфом абсолютного значения полезного сигнала можно было пренебречь. Многократная запись повторяющегося цикла с последующим усреднением по точкам позволила улучшить соотношение сигнал-шум, а запись полезного сигнала по описанной выше процедуре — пренебречь медленны-

ми дрейфами. В результате мы получили семейство зависимостей ВЧ-поглощения, измеренных в относительных единицах, но в одинаковом масштабе и при одинаковом смещении относительно абсолютной шкалы. Абсолютное значение величины ВЧ-поглощения в данном случае не имеет физического смысла, поскольку отсчитывается от произвольного уровня. В отличие от предыдущей работы, измерения были проведены в большем диапазоне скоростей изменения магнитного поля.

Форма представленных зависимостей имеет характерный вид и мало меняется при изменении скорости развертки магнитного поля больше чем в сто раз (от 0.3 до 350 кЭ/с). Перед изменением направления развертки магнитного поля образец находится в критическом состоянии. Сверхпроводящая оболочка пронизана вихрями Кулика, которые движутся под действием протекающего по всей оболочке тока (критического тока). Этому соответствуют линейные участки на рис. 1. После изменения направления развертки (изменения знака  $dB/dt$ ) образец выходит из критического состояния, происходит уменьшение величины экранирующих токов и постепенное изменение направления их протекания на противоположное. Это приводит к минимумам в зависимостях ВЧ-поглощения из-за выхода части вихрей Кулика из сверхпроводящей оболочки. При достижении плотностью сверхпроводящего тока критического значения в противоположном направлении, вдоль образца через сверхпроводящую оболочку начинают входить и двигаться вихри Кулика, обеспечивающие изменение магнитного потока внутри образца. Вихри распространяются вдоль оси по всему образцу, чему соответствуют возрастающие участки. При достижении вихрями противоположного торца цилиндра образец вновь переходит в критическое состояние, соответствующее линейному участку.

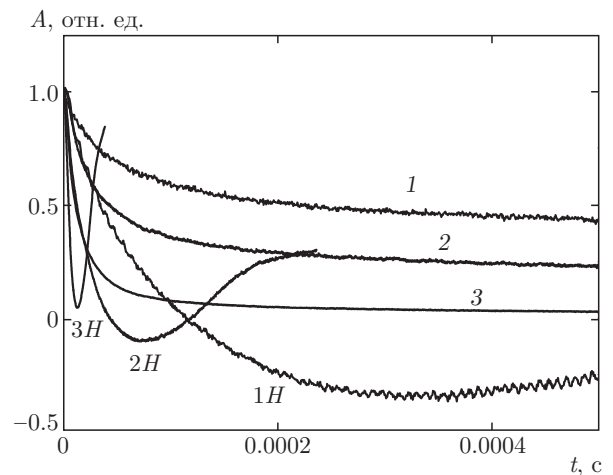
На рис. 1 видно, что с увеличением скорости изменения магнитного поля происходит рост ВЧ-поглощения в критическом состоянии. Наблюдаемые особенности позволяют нам построить зависимости уровня ВЧ-поглощения в критическом состоянии. Эти зависимости приведены на рис. 2. Согласно предположениям, высказанным в работе [13], начальный рост ВЧ-поглощения с увеличением скорости изменения магнитного поля в основном связан с увеличением количества пронизывающих сверхпроводящую оболочку вихрей до тех пор, пока не будет достигнута их критическая плотность. При этом вихри будут двигаться вдоль образца со скоростью, необходимой для обеспечения изменения магнитно-



**Рис. 2.** Изменение уровня ВЧ-поглощения в критическом состоянии при уменьшении магнитного поля в зависимости от скорости изменения магнитного поля. За нуль ВЧ-поглощения принят уровень в минимуме при малой скорости изменения магнитного поля

го поля внутри образца в соответствии с изменением внешнего магнитного поля. При дальнейшем увеличении скорости развертки плотность пронизывающих оболочку вихрей должна оставаться постоянной, а для соблюдения баланса магнитных полей вне и внутри образца будет увеличиваться скорость движения вихрей. В первом приближении скорость движения вихрей не должна оказывать влияния на уровень ВЧ-поглощения. В эксперименте переход ВЧ-поглощения к режиму насыщения не наблюдается.

Также нами были измерены зависимости ВЧ-поглощения от времени после изменения направления развертки внешнего магнитного поля и после остановки развертки магнитного поля, при разных скоростях изменения магнитного поля (рис. 3). Перед остановкой развертки образец находился в критическом состоянии (кривые 1, 2, 3). Сверхпроводящую оболочку пронизывало некоторое количество вихрей Кулика, движение которых обеспечивало разные значения магнитного поля вне и внутри образца. По сверхпроводящей оболочке после остановки развертки магнитного поля продолжают протекать экранирующие токи, время затухания которых велико. Следовательно, со стороны этих токов на вихри будет продолжать действовать сила Лоренца, выталкивающая вихри из сверхпроводящей оболочки, при этом уменьшая различие между внешним и внутренним полями. Параллельно с этим внутренняя индукция станет пространственно-однородной в



**Рис. 3.** Временная зависимость ВЧ-поглощения после остановки развертки магнитного поля (скорость развертки магнитного поля перед остановкой 5.61 (1), 29.25 (2), 289.3 (3) кЭ/с) и после смены направления развертки магнитного поля (1H, 2H, 3H с аналогичными скоростями развертки). Величина ВЧ-поглощения нормирована на разность величин ВЧ-поглощения в точке остановки (изменения направления развертки поля) и через 10 мс после остановки, для каждой пары зависимостей с одинаковой скоростью изменения магнитного поля

результате выравнивания распределения, связанного со скин-эффектом. Независимо от того, куда разворачивалось магнитное поле, этот процесс будет приводить к увеличению модуля разности внутренних и внешних полей, тем самым ускоряя выход вихрей. Чем выше была частота изменения магнитного поля, тем сильнее неоднородность и больший эффект от выравнивания.

Теперь обратимся к результатам измерений после смены направления развертки магнитного поля (рис. 3, а также полная кривая рис. 1). Из сравнения этих рисунков видно, что в то время как на полевых зависимостях поведение поглощения достаточно близкое, на временных масштабах особенности сильно меняются с изменением скорости. Процесс начинается с остановки развертки магнитного поля и начала его изменения в другую сторону (после уменьшения — увеличение и наоборот). Если считать, что основная (переменная) часть поглощения связана с вихревой структурой, т. е. с сопротивлением течения магнитного потока, то величина поглощения будет отражать количество вихрей Кулика в сверхпроводящей оболочке. Как видно из кривых, выход вихрей из оболочки происходит более интенсивно и до большей степени, чем после остановки развертки магнитного поля. Но как мы знаем из изучения процесса размагничивания

[13], достаточное количество вихрей все-таки остается. Где-то в окрестности точки минимума поглощения на краю оболочки вследствие индукционных токов в ней начинают образовываться вихри Кулика и распространяться в оболочку. При достижении линейного участка (рис. 1) вся сверхпроводящая оболочка переходит в критическое состояние, т. е. магнитный поток в виде вихрей Кулика существует по всей длине оболочки и движется в том или ином направлении. Участок кривой от минимума до линейной зависимости соответствует распространению вихрей вдоль образца. Если теперь сравнить данные на рис. 1 и 3, то видно, что на полевых зависимостях результаты мало чем различаются для различных частот. Это на самом деле хорошо соответствует временным зависимостям (рис. 3). Результат этого сравнения таков, что образец в области поверхностной сверхпроводимости способен поддерживать необходимую разность внутреннего и внешнего магнитных полей в широкой области скоростей. Для предложенной нами модели это соответствует широкому диапазону изменения произведения  $vn$  — скорости вихрей Кулика и их концентрации.

Перед переходом в критический режим по поверхности сверхпроводника протекает экранирующий ток, который определяет необходимую разность внутреннего и внешнего магнитных полей. При переходе в критический режим избыточная скорость возрастания магнитного поля генерирует вихри магнитного потока вблизи торца образца, которые под влиянием силы Лоренца со стороны экранирующего тока движутся в поверхностной оболочке вдоль оси цилиндрического образца к противоположному торцу, протаскивая магнитный поток внутрь образца. Магнитный поток, проникая в нормальную сердцевину образца, возбуждает там индукционные токи, которые могут играть свою роль в изучаемом процессе. Максимальная плотность тока, текущего по сверхпроводящей поверхности, не зависит от скорости развертки магнитного поля и не может превышать критическую величину для заданной величины магнитного поля и температуры. Избыточный ток (выше критического), возникающий вследствие наличия  $dB/dt$ , преобразуется в вихревые возбуждения, которые движутся вдоль поверхности. Скорость движения вихрей вдоль образца в установившемся режиме должна быть одинаковой по всей поверхности (за исключением окрестности торцов образца). Произведение плотности вихрей, пронизывающих сверхпроводящую оболочку, и их скорости определяет способность этого процесса поддерживать необходимую разность магнит-

ных полей снаружи и внутри образца. Максимальная плотность вихрей отвечает ситуации, когда ко-ры вихрей будут близки к состоянию перекрытия (аналогично ситуации объемных сверхпроводников второго рода вблизи  $H_{c2}$ ). В случае превышения этого количества вихрей должно происходить разрушение сплошной поверхностной сверхпроводимости, магнитные поля внутри и снаружи образца становятся равными, и поверхностная сверхпроводимость может восстанавливаться. В этом случае должен возникнуть некоторый нестационарный процесс. В своих измерениях мы не наблюдали каких-либо катаклизмов. При самых высоких скоростях изменения магнитного поля, использованных нами (350 кЭ/с), наблюдался характерный вид гистерезиса ВЧ-поглощения, что говорит о сохранении сверхпроводящей оболочки, обеспечивающей протекание сверхпроводящих экранирующих токов.

После проникновения магнитного поля сквозь поверхностную сверхпроводящую оболочку магнитный поток встречает не изолятор, а нормальный металл, где существует скин-эффект. Скин-эффект задерживает магнитный поток у «границы раздела сверхпроводник — нормальный металл» в меру скорости изменения магнитного поля. Скин-глубина в нашем случае порядка миллиметра. Согласно этому, в уравнении (4) работы [13]

$$vn = (dB/dt)Sl/\Psi_0$$

необходимо в площади сечения образца учесть влияние на распределение индукции скин-эффекта  $S'(\omega) < S$ . (Здесь  $n$  — концентрация вихрей,  $v$  — скорость движения вихрей,  $dB/dt$  — скорость изменения магнитной индукции,  $S$  — площадь сечения,  $l$  — длина образца,  $\Phi_0$  — величина кванта магнитного потока.) Это может влиять на форму гистерезисных кривых (рис. 1). А после остановки развертки, что мы использовали в измерениях, магнитная индукция внутри образца станет однородной. Независимо от того, куда разворачивается магнитное поле, этот процесс будет приводить к увеличению модуля разности внутренних и внешних полей, тем самым ускоряя выход вихрей. Чем выше частота изменения магнитного поля, тем сильнее неоднородность и больший эффект от выравнивания. Одна из целей данной работы состояла в желании посмотреть, что произойдет со сверхпроводящей оболочкой при такой скорости изменения магнитного поля, при которой оболочка не справится с пропусканием магнитного потока. Мы ожидали какой-то резкой особенности на кривой зависимости изменения импеданса от скорости



изменения магнитного поля (рис. 1, 2). Но никакой особенности мы не обнаружили.

Следующее обстоятельство, на которое нужно обратить внимание, — это скорость движения вихрей. В работе [13] мы оценили эту скорость как 1 см/с, исходя из различных оценок для движения вихревых нитей в объемных сверхпроводниках (см. [15]). Коль скоро она такая маленькая, то за период изменения магнитного поля вихри могут занять только малую часть длины образца при наличии локализованного источника вихрей, и не будет перехода к стационарному состоянию течения потока. Так что придется вернуться к обсуждению сохранения формы кривых на рис. 1 (ну и фактически к предыдущим нашим работам [13]).

В работе [16] в качестве чувствительного элемента высокочастотного СКВИДа (частота — 30 МГц, длина — несколько миллиметров) был использован тонкопленочный ниобиевый цилиндр. Из работы этого устройства следовало, что квант потока пробегает длину цилиндра за время, меньшее  $10^{-7}$  с, т. е. в пленках кванты магнитного потока движутся очень быстро. Наш образец в условиях поверхностной сверхпроводимости отличался от тонкопленочного цилиндра тем, что с одной стороны сверхпроводящей поверхности в тесном контакте находился нормальный металл. Проблема движения магнитного потока в случае сверхпроводящей оболочки поверхностной сверхпроводимости в теоретических работах, кроме работ Кулика, нигде не обсуждалась (в частности, частота депиннинга). Оценка из наших измерений для  $dB/dt = 350$  кЭ/с дает

$$v = \frac{dB/dt}{n\Phi_0} > 30 \text{ м/с.}$$

Кроме того, наши измерения говорят о том, что скорость вихрей Кулика зависит от скорости изменения магнитного поля. В ситуации остановки развертки магнитного поля скорость выхода вихрей Кулика незначительно зависит от скорости изменения поля перед остановкой. Возможно, эта зависимость обусловлена различными плотностями вихрей, и в этом случае на процесс релаксации может воздействовать скин-эффект в нормальной фазе.

В двумерных пленочных структурах для описания критического тока вместо вихревых образований иногда используют линии проскальзывания фазы [17]. Вопрос о возможности применения подобного подхода к поверхностной сверхпроводимости остается открытым, поскольку конкретных знаний об этих объектах в настоящее время недостаточно.

Таким образом, в работе экспериментально показано, что величина дополнительного ВЧ-поглощения, связанная с вихрями Кулика, не обнаруживает признаков насыщения и других критических изменений вплоть до скоростей изменения магнитного поля 350 кЭ/с, что указывает на большую скорость движения вихрей Кулика по сравнению с вихрями Абрикосова в массивных сверхпроводниках. Скорость движения вихрей Кулика по крайней мере превосходит 30 м/с. Подтверждено, что изменение величины ВЧ-поглощения в критическом состоянии поверхностной сверхпроводимости в слабо меняющемся магнитном поле в основном определяется наличием вихрей Кулика. Указано, что на их динамику в изменяющемся магнитном поле может влиять нормальная сердцевина образца.

## ЛИТЕРАТУРА

1. D. Saint-James and P. G. de Gennes, *Phys. Lett.* **7**, 306 (1963).
2. D. Saint-James, G. Sarma, and E. J. Thomas, *Type-II Superconductivity*, Pergamon, New York (1969).
3. G. I. Leviev, V. M. Genkin, M. I. Tsindlekht, I. Felner, Y. B. Paderno, and V. B. Filippov, *Phys. Rev. B* **72**, 064506 (2005).
4. J. Kötzer, L. von Sawilski, and S. Casalbuoni, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 067005 (2005).
5. A. V. Pan and P. Esquinazi, *Phys. Rev. B* **70**, 184510 (2004).
6. J. Scola, A. Pautrat, C. Goupil, L. Méchin, V. Hardy, and Ch. Simon, *Phys. Rev. B* **72**, 012507 (2005).
7. А. А. Абрикосов, *Основы теории металлов*, Наука, Москва (1987).
8. И. О. Кулик, *ЖЭТФ* **55**, 889 (1968).
9. H. R. Hart, Jr. and P. S. Swartz, *Phys. Rev.* **156**, 403 (1967).
10. P. Mathieu, B. Plaçais, and Y. Simon, *Phys. Rev. B* **48**, 7376 (1993).
11. M. Aburas, A. Pautrat, and N. Bellido, *Supercond. Sci. Technol.* **30**, 015009 (2017).
12. С. А. Говорков, Е. В. Ильичев, В. А. Тулин, Письма в *ЖЭТФ* **56**, 22 (1992).
13. В. А. Березин, В. А. Тулин, *ЖЭТФ* **143**, 535 (2013).
14. K. Maki, *J. Low. Temp. Phys.* **3**, 545 (1970).
15. В. В. Шмидт, *Введение в физику сверхпроводников*, Наука, Москва (1982).
16. В. М. Закосаренко, Е. В. Ильичев, В. А. Тулин, Письма в *ЖТФ* **15**, 41 (1989).
17. В. Лемпицкий, *ЖЭТФ* **90**, 462 (1986).