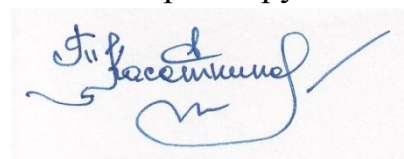


На правах рукописи



**Касаткина Татьяна Игоревна**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В АНСАМБЛЕ ВИХРЕЙ МАГНИТНОГО ПОТОКА  
В ИТТРИЕВЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ В НЕОДНОРОДНОМ ЛОКАЛЬНОМ  
МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Курск - 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО Воронежский государственный технический университет на кафедре «Физика твердого тела»

Научный руководитель	доктор физико-математических наук, доцент, <b>Голев Игорь Михайлович</b>
Официальные оппоненты:	<b>Харламов Владимир Федорович,</b> доктор физико-математических наук, Государственный университет – учебно- научно-производственный комплекс (г. Орел), профессор кафедры физики;  <b>Санин Владимир Николаевич,</b> доктор физико-математических наук, Военно-воздушная инженерная орденов Ле- нина и Октябрьской Революции Краснозна- менная академия имени профессора Н.Е. Жу- ковского (г. Воронеж), профессор кафедры физики и химии
Ведущая организация	Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж

Защита состоится «19» декабря 2013 г. в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д **212.105.04** при Юго-Западном государственном университете по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета.

Автореферат разослан «15» ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.105.04, кандидат  
физико-математических наук



Рослякова Л. И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Технические устройства с использованием сверхпроводников обладают макроскопическими квантовыми эффектами и имеют потенциально лучшие параметры по сравнению с приборами «нормального» исполнения. Ограничивающим фактором являются физические процессы, связанные с движением вихрей магнитного поля в объеме сверхпроводника. Они связаны с особенностями как динамики вихрей магнитного поля, так и особенностями их взаимодействия с реальной кристаллической структурой.

В настоящее время широкое распространение получили сверхпроводящие устройства с использованием постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов. Их особенностью является переход их конструктивных элементов в сверхпроводящее состояние при наличии магнитного поля - в режиме FC (field cooling process). Кроме того, в объеме сверхпроводников присутствует неоднородное локальное магнитное поле, которое определяет особенности физических процессов в вихревой структуре.

В предлагаемой работе проведены экспериментальные исследования физических процессов в ансамбле вихрей магнитного потока в иттриевых сверхпроводниках состава 1-2-3. Наибольший научный интерес представляют исследования процесса пиннинга вихрей, их вязкого движения и релаксационных явлений. Это необходимый шаг на пути построения картины поведения сверхпроводников в неоднородном локальном магнитном поле. Проблема является фундаментальной, без ее решения эффективное использование данных материалов в технических устройствах не представляется возможным.

Тематика диссертации соответствует “Перечню приоритетных направлений фундаментальных исследований”, утвержденных президиумом РАН (раздел 1.2 – “Физика конденсированного состояния вещества”). Выполненная работа является частью комплексных исследований, проводимых на кафедре физики твердого тела по плану госбюджетной темы НИР № ГБ 2007.23 – «Синтез, структура и физические свойства новых конструктивных и функциональных материалов» в ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет».

**Цель работы.** Выявление физических закономерностей процессов, протекающих в ансамбле вихрей магнитного потока в иттриевых высокотемпературных сверхпроводниках различной структуры, в условиях воздействия неоднородного локального магнитного поля.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Разработать и создать экспериментальную установку для исследования физических процессов в ансамбле вихрей высокотемпературных сверхпроводников в неоднородном локальном магнитном поле величиной 0,05-0,2 Тл, тем-

пературой 77К, чувствительностью по силе  $2 \cdot 10^{-3}$  Н, скоростью движения области магнитного потока 0 - 0,15 м/с.

2. Исследовать влияние пиннинга вихрей неоднородного локального магнитного потока на особенности механического взаимодействия магнитной системы и сверхпроводника.

3. Экспериментально исследовать предельно возможные параметры сил пиннинга и критического тока иттриевых ВТСП.

4. Исследовать изменения сверхпроводящих параметров иттриевых сверхпроводников в зависимости от времени их хранения в атмосфере.

5. Изучить релаксационные процессы в ансамбле вихрей иттриевых сверхпроводников при воздействии неоднородного локального магнитного поля.

**Объект исследований.** В качестве объектов исследования использовались высокотемпературные массивные сверхпроводники системы YBaCuO состава 1-2-3 изотропной керамики и полученные по технологии Top-Seeded-Melt-Growth. Соединение  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  является типичным представителем высокотемпературных сверхпроводников и может рассматриваться как модельная система для изучения основных физических процессов, протекающих в условиях воздействия внешних магнитных полей. Кроме того, выбор материалов обусловлен следующими причинами:

- используемые технологии их получения достаточно отработаны, что позволяет изготавливать образцы хорошего качества, с заданным фазовым составом, воспроизводимыми свойствами и необходимых размеров;

- многие физические свойства данных соединений хорошо изучены, что облегчает интерпретацию полученных в работе результатов.

**Научная новизна** работы обусловлена изучением динамики вихрей неоднородного локального магнитного потока и определяется следующими результатами:

1. Установлено, что характер механического взаимодействия магнитной системы со сверхпроводником обусловлен пиннингом вихрей на дефектах реальной кристаллической структуры.

2. Обнаружено явление возникновения дополнительной механической силы, направленной противоположно градиенту неоднородного магнитного поля, и вызванное движением ансамбля вихрей в сверхпроводнике.

3. Экспериментально доказано, что при охлаждении сверхпроводника в магнитном поле пиннирование вихрей происходит на дефектах кристаллической структуры в соответствии с принципом минимизации свободной энергии.

**Практическая значимость работы.** Полученные результаты способствуют углублению фундаментальных представлений о процессах, происходящих в ансамбле вихрей иттриевых сверхпроводников с различной структурой, находящихся в неоднородных локальных магнитных полях. Это, в свою очередь,

является необходимым при разработке сверхпроводящих элементов криогенных устройств: чувствительных элементов криогенных гравиинерциальных приборов, топологических генераторов, ВТСП двигателей, МЭМП и НЭМП. Предложенная для проведения исследований физических и магнитных свойств высокотемпературных сверхпроводников установка запатентована.

**Основные положения и результаты, выносимые на защиту.** На основании результатов проведенных исследований были сформулированы следующие основные положения, выносимые на защиту:

1. Движение ансамбля вихрей магнитного потока в объеме сверхпроводника в неоднородном локальном магнитном поле вызывается механической силой, величина которой определяется процессами их пиннинга.

2. Измерение механической силы действующей на сильно и слабо запиннигованные вихри позволяет определить максимальный критический ток и предельную силу пиннинга.

3. Деградационная устойчивость иттриевых сверхпроводников во многом определяется технологией их изготовления: у изотропных ВТСП она существенно ниже чем у крупнодоменных.

4. В ансамбле вихрей неоднородного локального магнитного поля наблюдается релаксационный процесс, имеющий время релаксации 120 - 300 с, вызванный термоактивированным депиннингом вихрей.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались на III Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва, 2009); VII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (Москва, 2010); 50-й научно – технической конференции профессорско – преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов (Воронеж, 2010); IX Международной заочной научно-практической конференции «Естественные и математические науки в современном мире» (Новосибирск, 2013); VII Международной заочной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы математики, физики, биологии» (Москва, 2013); XVI Международной заочной научно-практической конференции «Научная дискуссия: инновации в современном мире» (Москва, 2013).

**Публикации и личный вклад автора.** По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 3 – в рецензируемых научных изданиях. Имеется 1 патент на полезную модель. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит подготовка и проведение эксперимента, получение и анализ экспериментальных данных.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы из 124 наименований. Основная часть работы изложена на 115 страницах, содержит 46 рисунков, 15 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, определены объекты исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные результаты и положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов работы, публикациях, структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** дается обзор по теме диссертации. Рассмотрены основные результаты, полученные с использованием методов, которыми проводятся исследования механических сил, моментов и диссипации энергии, движущихся в магнитном поле сверхпроводника; а также ряд сверхпроводящих устройств, для которых диссипативные процессы в элементах оказывают существенное влияние на работоспособность. Первая глава состоит из четырех разделов. В первом разделе главы собраны и проанализированы наиболее значимые результаты исследований динамики магнитного потока в сверхпроводниках механическим методом в однородном магнитном поле. Показано, что измерения в статике, с помощью которых судили о величине механических сил и их моментов, действующих на сверхпроводник в магнитном поле, позволили исследовать диссипативные процессы в сверхпроводниках и дали достаточно полную информацию о силе закрепления вихрей Абрикосова и энергии их взаимодействия с дефектами кристаллической решетки.

Во втором разделе первой главы рассмотрены результаты исследований в случае воздействия на сверхпроводник неоднородного магнитного поля. Рассмотренные работы посвящены исследованию сверхпроводящих пластин, располагающихся между полюсами магнитной системы. Показано, что исследование сверхпроводников в данной физической ситуации позволяет получать большую информацию об их поведении в магнитном поле. Было исследовано проникновение магнитного поля в объем сверхпроводника, динамика вихревой структуры и релаксационные явления в условиях влияния реальной кристаллической структуры. На основании приведенной теоретической модели были изучены эти физические процессы, получены количественные оценки ряда параметров сверхпроводников: критические поля, сила пиннинга, критический ток, энергия активации вихрей, модуль упругости вихревой решетки.

В третьем разделе главы рассмотрены сверхпроводниковые магнитные опоры на основе иттриевых ВТСП, их основные параметры, особенности конструктивных решений и существующие методы определения их электромагнитных и левитационных характеристик. Показано, что в подобных устройствах сверхпроводящие элементы подвергаются воздействию неоднородного локального магнитного поля.

В четвертом разделе рассмотрены объемные образцы иттриевой керамики, особенности технологий их получения, факторы, влияющие на достижения требуемых физических свойств, проблемы и способы их разрешения на пути улучшения сверхпроводящих качеств. Показано влияние ориентации зерен на полученную текстуру, а также таких проблем, как низкая скорость кристаллизации; необходимость контроля температурных градиентов в высокотемпературном процессе; ограниченный размер полученных доменов, сопровождаемый их разориентацией, микротрещинами и неоднородной композицией; уплотнение образца, управляемое поверхностным натяжением. Приведены сведения о существующих ныне методах кристаллизации иттриевых сверхпроводников из расплава.

На основании рассмотренных источников было показано, что движение СП в однородных и неоднородных магнитных полях приводит к появлению дополнительных механических моментов в системе сверхпроводник-магнит и диссипации энергии механического движения в его объеме. Природа этих физических явлений зависит как от внутренних, так и от внешних факторов. К внутренним факторам отнесены характер динамики вихрей магнитного потока в объеме сверхпроводника, наличие в нем различных по размерности дефектов и особенности взаимодействия с ними вихрей. Внешними факторами являются характер магнитного поля (однородное или неоднородное, локальное или нелокальное), его ориентация относительно поверхности сверхпроводника и его фактор размагничивания.

Физические процессы, которые реализуются во многих сверхпроводящих устройствах с использованием массивных сверхпроводников, при воздействии на них неоднородных локальных магнитных полей исследованы недостаточно. Поэтому в работе были поставлены задачи исследования поведения сверхпроводников при воздействии на них перпендикулярного их поверхности локального неоднородного магнитного поля и выявления закономерностей динамики вихрей магнитного потока при наличии различных внешних и внутренних факторов, таких как реальная кристаллическая структура сверхпроводника, определяемая технологией изготовления; распределение магнитного поля в объеме сверхпроводника. В качестве объектов исследований были выбраны массивные иттриевые сверхпроводники, которые в настоящее время нашли наиболее широкое практическое применение.

**Во второй главе** проводится описание разработанной и изготовленной экспериментальной установки, отвечающей поставленным требованиям по диапазону параметров и чувствительности, а также рассмотрены вопросы методики и техники проведения эксперимента. Описываются технологии изготовления массивных иттриевых образцов. Вторая глава состоит из двух разделов.

В первом разделе описана установка для исследования физических и магнитных свойств высокотемпературных сверхпроводников в неоднородном локальном магнитном поле величиной 0,05-0,2 Тл, при температуре 77 К, с чувствительностью по силе  $2 \cdot 10^{-3}$  Н, при скорости движения области магнитного

потока 0 - 0,15 м/с. Установка включается в себя низкотемпературную часть, измерительный модуль и электронные измерительные устройства. Исследуемый сверхпроводник в форме диска в ме́йсснеровском состоянии на подвижной системе вывешивается с помощью торсионного подвеса. В его объеме под действием постоянных магнитов, размещенных на магнитном экране и выполненных из магнитного сплава NdFeB с полем  $B_0$ , превышающем первое критическое поле  $B_{к1}$ , формируются три неоднородные локальные области магнитного поля (НЛП) в виде вихрей Абрикосова. Основным измеряемым параметром в исследованиях является величина угла поворота сверхпроводящего диска от угла поворота магнитной системы. Установка позволяет проводить исследования при различных внешних условиях: величины воздействия постоянных магнитных полей и меняющейся скорости вращения магнитной системы.

Во втором разделе рассмотрены технологии изготовления массивных иттриевых металлооксидов методами твердофазного синтеза и текстурирования из расплава, приводятся условия изготовления и даны основные электрофизические параметры образцов.

**В третьей главе,** состоящей из четырех разделов, рассмотрены результаты исследования механического эффекта в иттриевых высокотемпературных сверхпроводниках в неоднородном локальном магнитном поле, в зависимости от различной величины внешнего магнитного поля и скорости его движения.

В первом разделе показано, что используемая методика позволяет обнаружить механический эффект и проводить исследования поведения ансамбля вихрей. Результаты представлялись в виде зависимостей  $F(z)$ , силы, действующей на вихри НЛП, от величины перемещения локальной области магнитного поля  $z$  по дуге окружности радиусом  $R_M$ . Было обнаружено, что зависимость имеет три выраженных участка: OA, AB и BC (см. рис. 1).

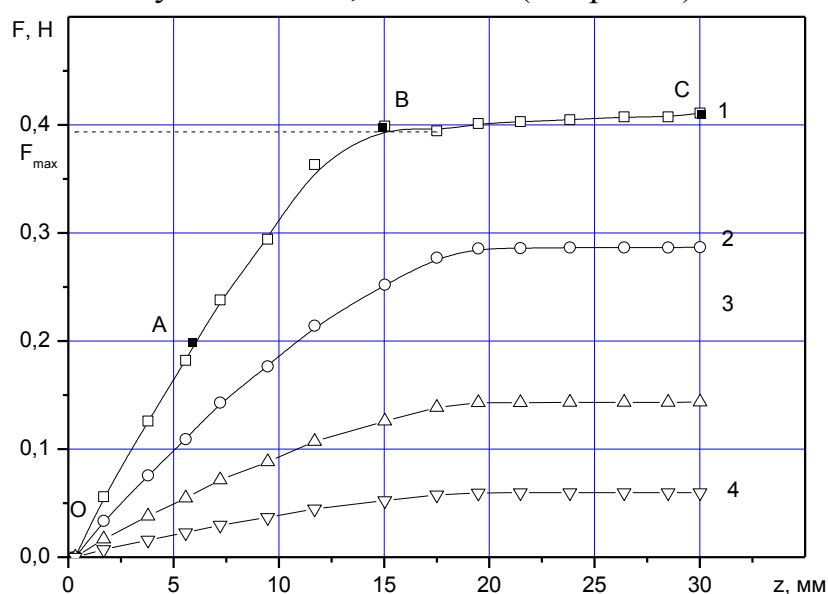


Рис. 1. Влияние величины магнитной индукции  $B_0$  на зависимости  $F(z)$ : 1- 0,2 ; 2- 0,15; 3- 0,1; 4- 0,05 Тл; образец партии ОТ-1



С ростом  $z$  на участке ОА значение  $F(z)$  линейно увеличивается и функциональную зависимость можно представить в виде  $F \sim z$ , на участке АВ  $\frac{dF}{dz}$  монотонно уменьшается, на участке ВС кривая выходит на насыщение, а сила, действующая на вихри, не зависит от смещения  $z$ .

В нашей экспериментальной ситуации при охлаждении сверхпроводящего диска в поле перпендикулярном его поверхности в режиме FC распределение локального магнитного поля в объеме сверхпроводника  $B_{0i}(\alpha_{mc})$  совпадает с распределением поля магнитной системы  $B_0(\alpha_{mc})$ . При некотором малом смещении магнитной системы на угол  $\Delta\alpha_{mc}$  поле магнитной системы сместится относительно вихрей, закрепленных на центрах пиннинга. В этом случае поле  $B_{0i}(\alpha_{mc})$  не будет совпадать с полем  $B_0(\alpha_{mc})$ . Считая, что все вихри изначально закреплены, при достаточно малых значениях  $\Delta\alpha_{mc}$ , распределение поля в объеме сверхпроводника будет

$$B_i(\alpha_{mc}, \Delta\alpha_{cm}) = B_0 \exp(-\beta(\alpha_{mc} - \Delta\alpha_{cm})^2) \quad (1)$$

Вихри локальной области магнитного поля  $B_0(\alpha_{mc})$  можно охарактеризовать магнитным моментом  $p_m$ . В данных областях неоднородного магнитного поля на них будет действовать возвращающая сила, среднее значение которой для  $N$  вихрей НЛП определяется углом поворота магнитной системы  $\Delta\alpha_{mc}$ :

$$f_{cp}(\Delta\alpha_{cm}) = \frac{1}{D_{НЛП}} \int_{-\frac{D_{НЛП}}{2}}^{\frac{D_{НЛП}}{2}} p_m(\alpha_{mc}, \Delta\alpha_{cm}) \frac{dB_0(\alpha_{mc})}{d\alpha_{mc}} d\alpha_{mc} \quad (2)$$

На начальном участке кривых, представленных на рис. 1, величина  $f_{cp}(\Delta\alpha_{cm})$  не превышает силу пиннинга всех вихрей локальной неоднородной области магнитного потока, величина которой оценена как

$$F_p = f_i N, \quad (3)$$

где  $f_i$  - сила пиннинга единичного вихря,  $N$  - число вихрей в НЛП.

При этом наблюдается обратимое (упругое) смещение вихрей и соответственно зависимость  $F(z)$  является линейной функцией на участке ОА. С ростом величины  $f_{cp}(\Delta\alpha_{cm})$  увеличивается сила, приложенная к вихрям НЛМ, и при превышении силы пиннинга слабо закрепленных вихрей происходит их срыв с центров закрепления. Они увлекаются магнитным полем магнитной системы и начинают движение по окружности радиусом  $R_{cn}$ . Сила пиннинга вихрей НЛП различна, число депиннигованных вихрей будет нарастать по мере поворота магнитной системы и движении НЛП по дуге  $z$ . По мере смещения поля магнитной системы все больше вихрей будет сорвано с центров пиннинга, что и объясняет характер зависимости кривой  $F(z)$  на участке АВ. Дальнейший рост силы  $f_{cp}$  приведет в конечном итоге к срыву всех вихрей, при этом она будет равна

$$f_{cp} = \sum_{i=1}^N f_i, \quad (4)$$

где  $f_i$  - значение силы пиннинга единичного вихря.

Для кривых на рис. 1 это область насыщения, характеризуемая силой  $F_{max}$ . Величина этой силы характеризует удельную силу пиннинга ансамбля

вихрей  $F_p$  магнитного поля в области сверхпроводника  $V_{\text{НЛП}}$  при заданном значении  $B_0$ :

$$F_p = \frac{F_{\text{max}}}{V_{\text{НЛП}}}. \quad (5)$$

Кроме силы, обусловленной пиннингом вихрей, существует и сила, связанная с вязким движением свободных вихрей в объеме сверхпроводника:

$$F_\eta(z) = \eta v_B N_c, \quad (6)$$

где  $\eta$  - коэффициент вязкости;  $v_B$  - скорость движения вихрей, равная  $v_{\text{НЛП}}$  - скорости движения области НЛП,  $N_c$  - число свободных вихрей.

Во втором разделе рассмотрена подробно область малого магнитного поля, где имеет место линейная зависимость  $F(z)$ . В рамках предлагаемых модельных представлений это объясняется тем, что на этом участке осуществляется силовое взаимодействие магнитного поля магнитной системы с вихрями магнитного потока области НЛП, запиннированными на дефектах кристаллической решетки. В конце линейного участка происходит срыв вихрей, количество которых описывается формулой:

$$N_c(z) = N[1 - \exp(-\frac{z}{k_p})^2], \quad (7)$$

где  $k_p$  - коэффициент, определяющий характером статистического распределения силы пиннинга вихрей (центров пиннинга). По сути эта ситуация соответствует переходу СП в резистивное состояние, когда вихри депиннируются за счет силы Лоренца при протекании транспортного тока. В нашей ситуации срыв вихрей осуществляется за счет силы взаимодействия магнитного момента вихря и поля магнитной системы.

Проводя аналогию между движением вихрей в резистивном состоянии СП и их движением в нашей экспериментальной ситуации, аналогом транспортного тока будет количество свободных вихрей  $N_c$ , возникающих при воздействии силы  $F$ . Аналогом напряжения - смещение вихрей под действием тока. Преобразовав уравнение (7) в виде  $z = f(N_c)$ , получим:

$$z = -k_p \ln \left[ -\frac{N - N_c}{N} \right]. \quad (8)$$

То есть появление в СП диске при движении области НЛП свободных вихрей означает переход сверхпроводника в резистивное состояние, а сила, приложенная к сверхпроводнику в этом случае, является критической  $F_c$ . Определив экспериментально ее значение, можно вычислить и величину критического тока  $J_c$

$$J_{\text{смех}} = \frac{F_c}{V_{\text{НЛП}} B_0}. \quad (9)$$

Принцип измерения  $F_c$  заключался в определении точки появления гистерезиса на зависимости  $F(z)$  путем циклического изменения величины смещения  $z$  «увеличение-уменьшение» при ее росте. Результаты экспериментов для образцов текстурированной и изотропной иттриевой керамики представлены на рис.2 и рис.3 соответственно.

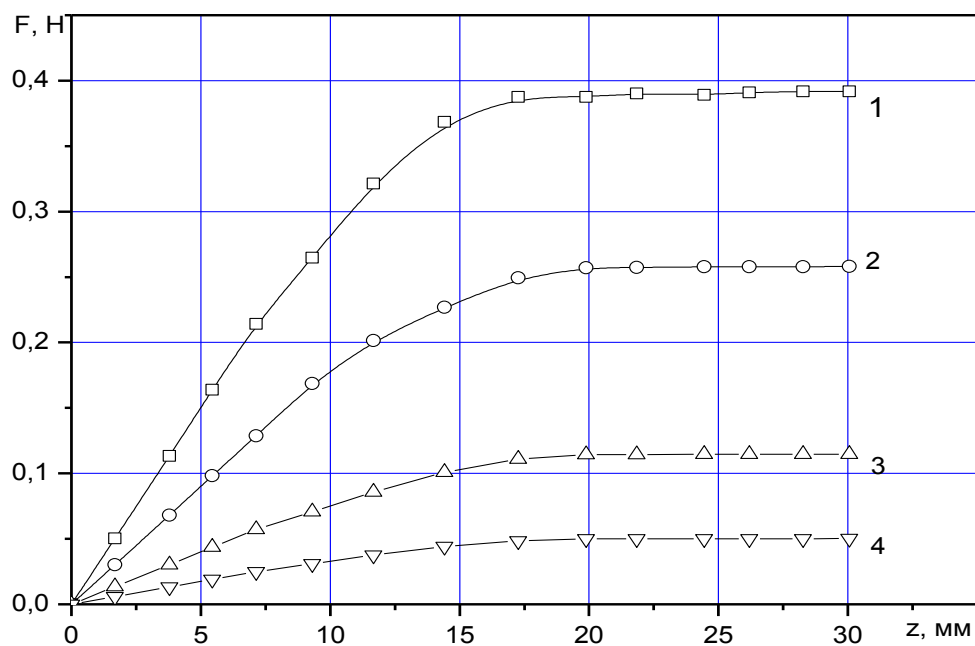


Рис. 2. Влияние величины магнитной индукции  $B_0$  на зависимости  $F(z)$ : 1- 0,2 ; 2- 0,15; 3- 0,1; 4- 0,05 Тл; образец тестируемой керамики ОТ-2

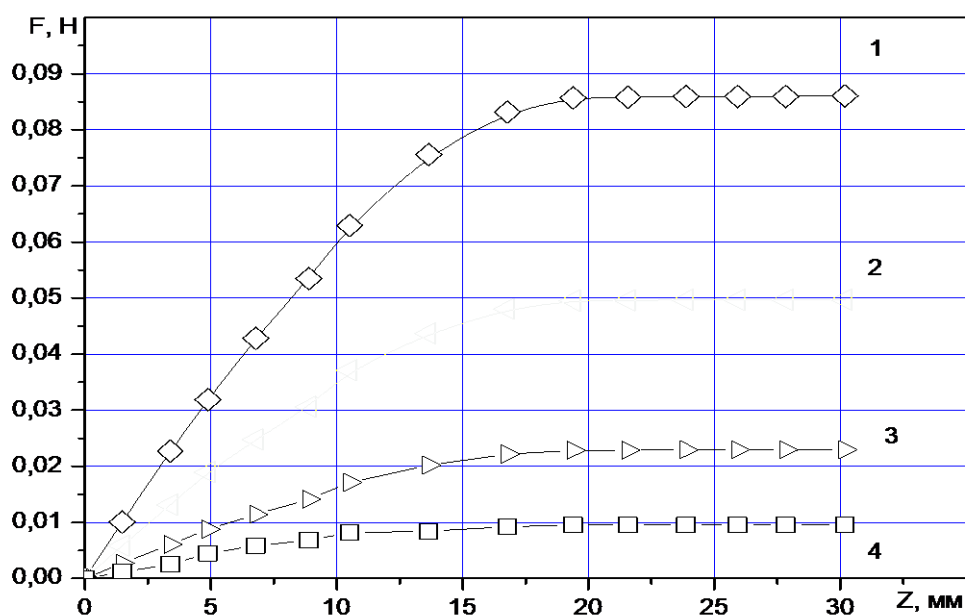


Рис. 3. Влияние величины магнитной индукции  $B_0$  на зависимости  $F(z)$ : 1- 0,2 ; 2- 0,15; 3- 0,1; 4- 0,05 Тл; образец изотропной керамики ОИ-1

Рассчитанные значения критической силы пиннинга и критического тока при значениях  $B_0=0,2$  Тл для образцов партии ОТ-1, ОТ-2 и ОИ-1 приведены в табл. 1-3 соответственно.

Таблица 1

Магнитное поле, $B_0$ , Тл	Сила пиннинга, $F_{pc}$ , Н/м <sup>3</sup> , 10 <sup>3</sup>	Сила пиннинга единичного вихря, $f_i$ , Н/м <sup>3</sup> , 10 <sup>-5</sup>	Ток крит. $J_{смех}$ А/м <sup>2</sup> , 10 <sup>6</sup>
0,05	240	15	4,7
0,1	330	7,3	3,3
0,15	420	5,3	2,8
0,2	520	4,5	2,6

Таблица 2

Магнитное поле, $B_0$ , Тл	Сила пиннинга, $F_{pc}$ , Н/м <sup>3</sup> , 10 <sup>3</sup>	Сила пиннинга единичного вихря, $f_i$ , Н/м <sup>3</sup> , 10 <sup>-5</sup>	Ток крит. $J_{смех}$ А/м <sup>2</sup> , 10 <sup>6</sup>
0,05	260	12,5	3,9
0,1	280	6,7	2,8
0,15	350	4,7	2,3
0,2	425	3,6	2,1

Таблица 3

Магнитное поле, $B_0$ , Тл	Сила пиннинга, $F_{pc}$ , Н/м <sup>3</sup> , 10 <sup>3</sup>	Сила пиннинга единичного вихря, $f_i$ , Н/м <sup>3</sup> , 10 <sup>-5</sup>	Ток крит. $J_{смех}$ А/м <sup>2</sup> , 10 <sup>6</sup>
0,05	23	1,5	0,45
0,1	38	0,09	0,39
0,15	47	0,06	0,31
0,2	5	0,045	0,26

Графическое представление полученных результатов показано на рис.4. Видно, что с ростом величины магнитной индукции поля плотность критического тока уменьшается. Для текстурированной керамики критический ток на порядок больше чем у изотропной. В области полей 0,05 -0,1 Тл для таких образцов  $J_{см}$  снизился в 1,5 раза, а для СП ОИ-1 в 1,1 раза. Это объясняется тем, что величина критического тока в гранулированных сверхпроводниках определяется прежде всего межгранульной средой, сверхпроводящие свойства которой существенно хуже гранул.

На рис. 5 представлены полевые зависимости величины силы пиннинга  $F_{pc}$  ансамбля вихрей области неоднородного локального магнитного поля. Видно, что с ростом величины магнитной индукции наблюдается увеличения силы пиннинга, который составил для ВТСП партии ОТ - 1,35 раза, а для ОИ – 1,6 раза. Факт разнонаправленного изменения величин  $F_{pc}$  и  $J_{см}$  объясняется

уменьшением силы пиннинга единичного вихря, что связано с межвихревым взаимодействием.

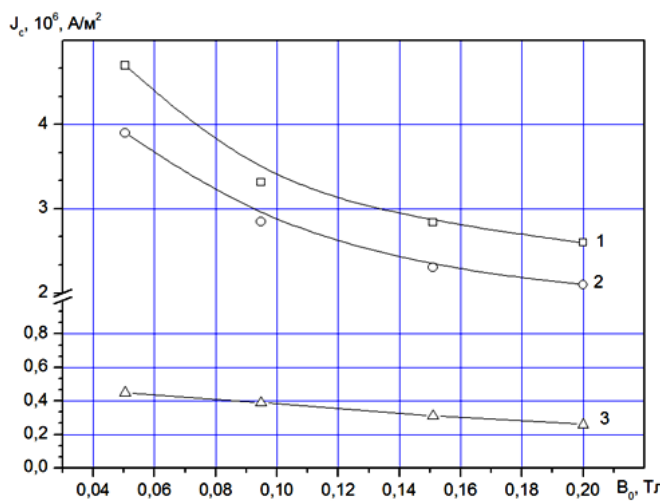


Рис. 4. Полевая зависимость критического тока  $J_{cm}$ : 1 – образец партии ОТ-1; 2 – ОТ-2; 3- ОИ-1

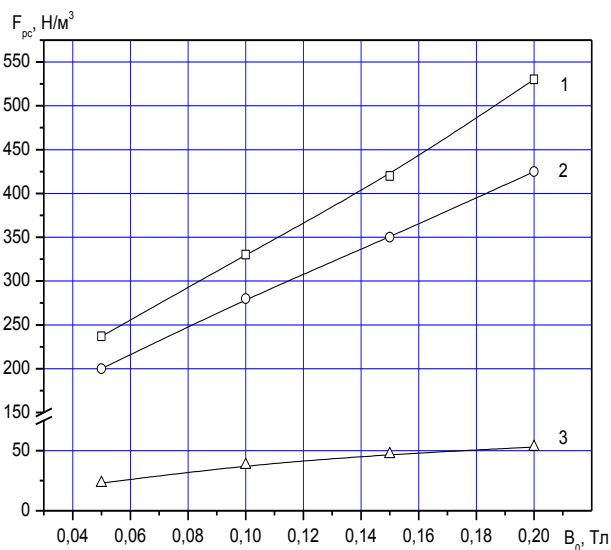


Рис. 5. Полевая зависимость силы пиннинга вихрей в области НЛП  $F_{pc}$ : 1 – образец партии ОТ-1; 2 – ОТ-2; 3- ОИ-1

В третьем разделе проведена оценка предельно возможных значений критического тока и силы пиннинга. При больших значениях силы  $F$ , превышающих силу пиннинга всех вихрей области НЛП, происходит открепление их центров, и при дальнейшем движении магнитной системы происходит их движение в кристаллической структуре сверхпроводника (участок ВС, кривая 1, рис.1). Значение силы  $F_{max}$ , при котором это происходит, можно определить как предельное значение величины пиннинга, которое может быть достигнуто в данном образце  $F_{pmax}$  при заданном значении магнитного поля. В случае экспериментального определения предельно возможного критического тока происходил депиннинг всех вихрей, как слабо, так и сильно закрепленных. При движении слабо закрепленных вихрей была оценена величина единичной силы их пиннинга, которая лежала в пределах  $(2-4) \cdot 10^{-5}$  Н/м<sup>3</sup> (рис.6, кривая 2), их количество составляло порядка 5% от общего числа.

При определении  $J_{cmax}$  определяющую роль играют оставшиеся 95% вихрей, среднее значение единичной силы пиннинга которых существенно выше (рис. 6, кривая 1). Как видно из этой зависимости, наибольшее значение  $f_i$  наблюдается в области малых полей. Это объясняется тем, что при формировании ансамбля вихрей НЛП вихри в первую очередь закрепляются на тех центрах пиннинга, где реализуется наибольший энергетический выигрыш и, соответственно, обеспечивают наибольшую силу пиннинга. На рис. 7 представлены значения критических токов  $J_{cmax}$  и  $J_{cmex}$  для изотропных сверхпроводников. В отличие от текстурированных СП, в области больших полей характер зависимостей различается.

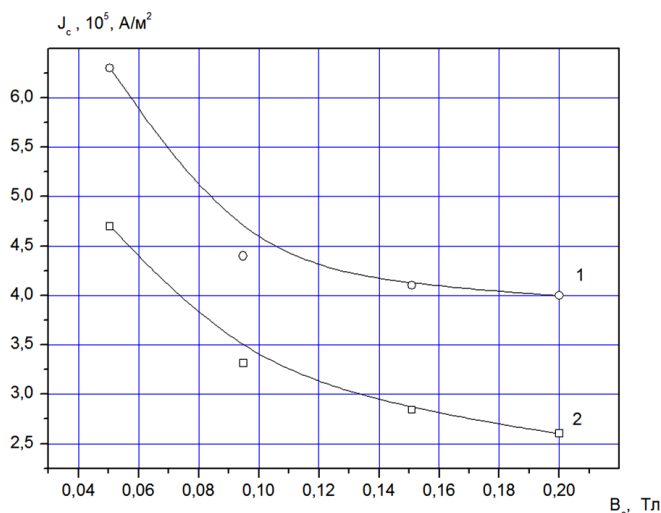


Рис. 6. Полевая зависимость критических токов: 1 -  $J_{cmax}$  ; 2 -  $J_{cмех}$ ; образец из партии ОТ-1

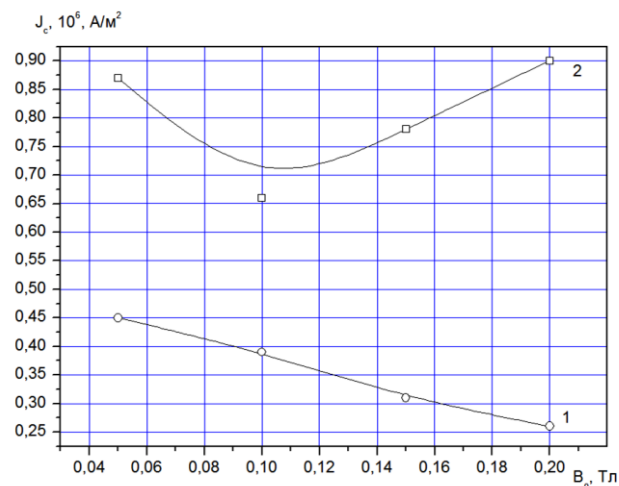


Рис.7. Полевая зависимость критических токов: 1 -  $J_{cmax}$  ; 2 -  $J_{cмех}$ ; образец из партии ОИ-1

В четвертом разделе исследована атмосферная деградация сверхпроводящих параметров иттриевых сверхпроводников. Проведены резистивные измерения основных электрофизических параметров: удельного сопротивления  $\rho_n$ , критического тока  $J_{cp}$ , температуры начала  $T_{nn}$  и окончания  $T_{no}$  сверхпроводящего перехода до и после хранения образцов в атмосфере в течение 6 месяцев. Было обнаружено, что для выдержанных образцов в области малых углов поворота кривые (линейные участки) идут несколько ниже. В области насыщения кривые  $F(z)$  практически совпадают. Это свидетельствует о снижении для них величины  $F_{pc}$  и соответственно  $J_{cмех}$ . Также выявлено, что при хранении образцов в атмосферном воздухе в течение 6 месяцев наблюдается заметная деградация их сверхпроводящих параметров: происходит увеличение сопротивления СП в нормальном состоянии. Наибольшие изменения происходят для изотропных образцов,  $\rho_n$  возрастает на 138%, а для текстурированных сопротивление увеличилось на 40%. Температуры начала сверхпроводящего перехода упали соответственно на 1,3 и 0,7 К.

**В четвертой главе**, состоящей из двух разделов, рассмотрены особенности движения вихрей, созданных неоднородным локальным магнитным полем, и связанные с данным движением процессы диссипации энергии в объеме сверхпроводника, а также процессы релаксации в ансамбле вихрей.

В первом разделе было показано, что при движении сорванных вихрей в объеме СП диска на него действует сила трения, обусловленная вязким движением вихрей, значения коэффициента вязкости при этом  $1,1 \cdot 10^{-10}$  Па·с. Также дополнительно возникает механическая сила  $F_{вер}$  в направлении от магнитной системы, связанная с наклоном вихрей. Для обнаружения подобных закономерностей были проведены эксперименты, в которых измерялся угол поворота сверхпроводящего диска  $\beta_{cn}$  от скорости вращения магнитной системы  $\omega$ . Скорость вращения магнитной системы изменялась в пределах от 25 до 110 об/мин,

что соответствовало скоростям движения вихрей по круговой траектории от 0,03 до 0,15 м/с. На рис. 8. представлены зависимости максимальной силы приложенной к сверхпроводящему диску  $F_{vmax}$  для одной области НЛП, от скорости движения вихрей магнитного потока  $v_B$ .

Величину силы, возникающей при движении вихрей, определяют как

$$F_{\eta}(z) = \sigma_n \frac{B_{c2}}{B_0} \Phi_0 B_0 v_B N_c, \quad (10)$$

где  $\sigma_n$  – сопротивление СП в нормальном состоянии,  $B_{c2}$  - второе критическое поле.

Из данной формулы сделан вывод, что сила вязкого трения зависит и от величины магнитного поля  $B_0$ .

Для определения механизма возникновения  $F_{вер}$  была смоделирована следующая физическая ситуация, рис.9. Из рисунка видно, что угол  $\varphi$  можно оценить из соотношения

$$\varphi = \arctg \frac{F_{вер}}{F_{\eta 1}(z, B_0)} \quad (11)$$

Для скорости движения вихрей в объеме сверхпроводника 0, 12 м/с значения сил для одной области НЛП:  $F_{\eta 1}(z, B_0) = 0,17$  Н,  $F_{вер} = 0,087$ . Тогда угол наклона вихрей будет равен  $\varphi \approx 30^\circ$ .

Во втором разделе проведены исследования релаксационного процесса

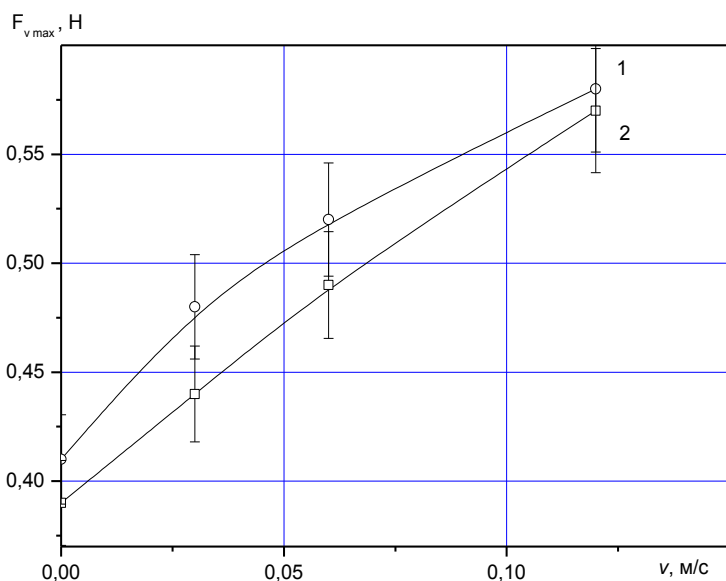


Рис. 8 Зависимость максимальной силы, приложенной к сверхпроводящему диску  $F_{vmax}$ , от скорости движения вихрей. 1- партия ОТ-1, 2 ОТ-2

при движении ансамбля вихрей в иттриевых сверхпроводниках в неоднородном локальном магнитном поле. Была исследована релаксация механического момента при повороте сверхпроводящего диска в неоднородном локальном магнитном поле. Исследования релаксационных процессов проводились следующим образом. При некотором угле поворота  $\alpha_1$  возникает сила  $F_{M1}$ , вызывающая поворот СП диска на угол  $\beta_1$ . Далее увеличение угла  $\alpha_1$  прекращалось, и с этого момента проводились измерения изменения

угла  $\beta_1$  во времени  $t$ . Сверхпроводящий диск, как показали исследования, в этих условиях продолжал поворачиваться на некоторый дополнительный угол  $\Delta\beta$ . При этом проводились измерения зависимости  $\Delta\beta$  от времени  $t$ .

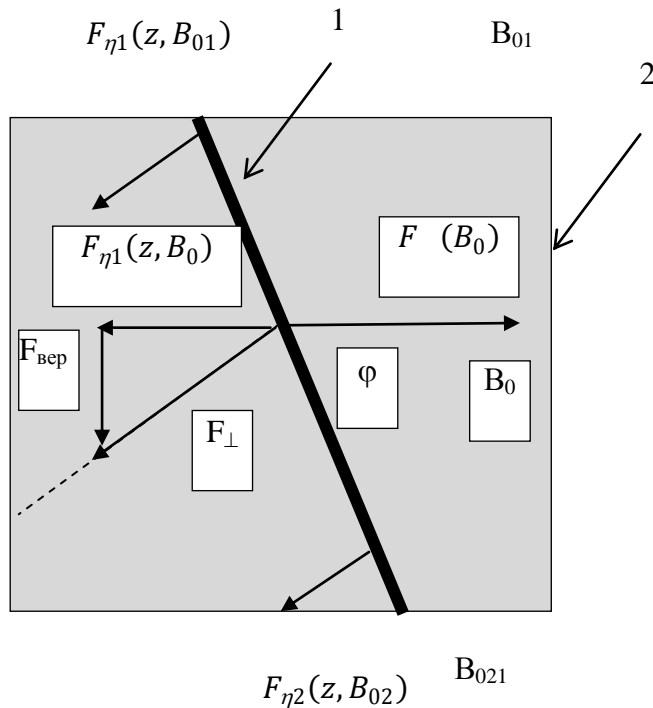


Рис. 9. Схематическое изображение расположения вихря в объеме сверхпроводника. 1- вихрь магнитного поля, 2- объем сверхпроводника.

в результате зависимость  $\Delta\beta = f(\ln t)$  на начальном участке линейная, что свидетельствует о релаксационной природе наблюдаемого явления. Оцененное время релаксации процесса составило 120 - 300 с.

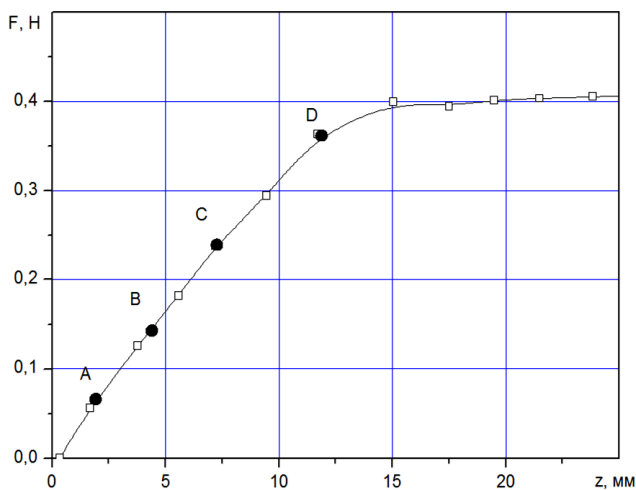


Рис. 10. Точки измерения релаксационных явлений на зависимости  $F(z)$ .  
Образец серии ОТ-1,  $B_0 = 0,2$  Тл

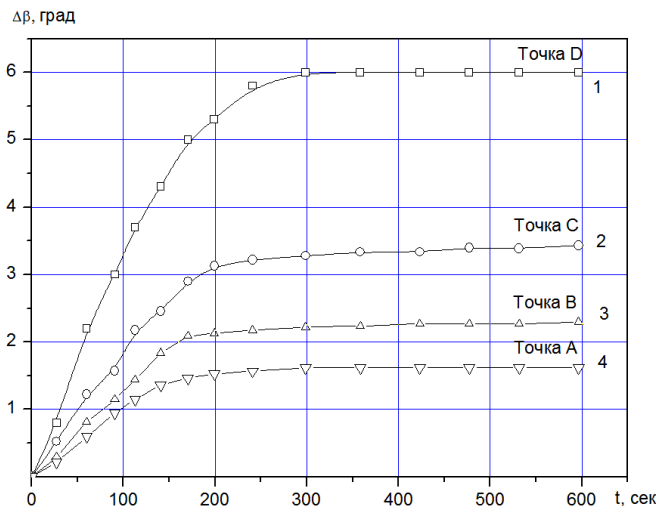


Рис. 11. Характерные зависимости  $\Delta\beta$  от времени  $t$ . Образец серии ОТ-1,  $B_0 = 0,2$  Тл

При воздействии на вихри ансамбля силы, возникающей при повороте магнитной системы, возникает возмущение, выводящее вихри, запиннигованные на дефектах кристаллической структуры, из состояния равновесия. Если энергия возмущения  $U_m$  вихря, за счет приложенной к нему внешней силы  $F$  превышает энергию пиннинга  $U_0$ , то вихрь срывается с центра пиннинга. В

На зависимости  $F(z)$  были выбраны точки А, В, С и Д, в которых количество закрепленных вихрей в области НЛП в соответствии с формулой (7) было 60, 40, 25 и 10% соответственно (рис.10).

На рис. 11 представлены характерные временные зависимости дополнительного угла  $\Delta\beta$  при увеличении силы воздействия  $F$  и, соответственно, уменьшении числа закрепленных вихрей. Так, с ростом значения силы  $F$  величина  $z$  смещения вихрей увеличивается: при  $F = 0,07$  Н (в точке А) дополнительное смещение составило 1 мм, а при  $F = 0,4$  Н (в точке Д) – 4,3 мм. В результате



противном случае он остается закрепленным, но энергетический барьер закрепления уменьшается и становится равным  $U_0 - U_M$ .

В нашей экспериментальной ситуации отсутствует влияние различного рода нестабильностей (переменная составляющая магнитного поля, сейсмические помехи и т.д.) на вихревую структуру, и появление дополнительного поворота диска сверхпроводника во времени (уменьшение величины возмущения системы) связано с термоактивируемым срывом вихрей с центров пиннинга.

Термоактивированное движение вихрей вызывает увеличение угла поворота СП диска до величины  $\beta_2$

$$\beta_2 = -\left(\frac{k_p}{R_M}\right) \ln \frac{(N_3 - N_T)}{N} = -\left(\frac{k_p}{R_M}\right) \Delta\beta_1 \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{U_0 - U_M}{kT}\right)\right] \quad (12)$$

Величина дополнительного угла, который определяется в эксперименте, тогда будет равна

$$\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 = -\left(\frac{k_p}{R_M}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{U_0 - U_M}{kT}\right)\right] \quad (13)$$

Среднее значение энергии активации вихрей было вычисленно как

$$U_0 = U_M - \left[ \ln \left( 1 - \exp\left(-R_M \cdot \frac{\Delta\beta}{k_p}\right) kT \right) \right] \quad (14)$$

При различных значениях  $F$  экспериментально определялись соответствующие значения  $\Delta\beta$ . При условии  $U_M \rightarrow 0$ , что соответствует условию  $F \rightarrow 0$  в соответствии с

$$U_M = r f_D = r \frac{F}{(N_3 + N_C)}, \quad (15)$$

определялось значение  $U_0$ .

При  $(U_0 - U_M)=0$  приложенная к вихрю сила возмущения по формуле (15) равна силе пиннинга. В этом случае можно было оценить величину ширины потенциальной ямы  $2r_0$ .

Таким образом, определены величины энергии активации и значения ширины потенциальной ямы. Для исследуемых образцов иттриевой керамики при  $B_0 = 0,2$  Тл значения энергии активации  $U_0$ , для изотропной керамики порядка 30 мэВ, для текстурированной порядка 45 мэВ. Расчетные значения ширины потенциальной ямы  $2r_0$  соответственно 35 и 20 Å. Исследования влияния магнитного поля показали, что с ростом величины его индукции энергия активации увеличивается, как и объемная сила пиннинга  $F_{pc}$ . Для сверхпроводников партий ОТ-1 и ОТ-2 значения энергии активации и ширины потенциальной ямы практически не отличались, что свидетельствует о слабой зависимости этих параметров от пористости материала и малом влиянии их на величины критического тока и силы пиннинга.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана и создана установка для исследования физических процессов в ансамбле вихрей неоднородного локального магнитного поля в иттриевых сверхпроводниках, имеющая следующие параметры:

- диапазон используемых магнитных полей 0,05- 0,2Тл;
- температура измерения 77 К;
- чувствительность по силе  $2 \cdot 10^{-3}$  Н;
- скорость движения неоднородных локальных областей магнитного потока 0 – 0,15 м/с;
- диаметр образцов 30 – 55 мм.

2. Впервые проведены исследования физических процессов в ансамбле вихрей, созданных неоднородным локальным магнитным полем. Показано, что величина механической силы, приложенной к ансамблю вихрей, определяется их пиннингом.

3. Показано, что с ростом величины магнитного поля энергия активации единичного вихря уменьшается из-за их взаимодействия.

4. Измерение максимальной силы механического взаимодействия магнитной системы и сверхпроводника позволяет оценить предельно возможные значения его критического тока и силы пиннинга сверхпроводника.

5. Показано, что при охлаждении сверхпроводника в присутствии магнитного поля вихри пиннингуются, в первую очередь, на дефектах кристаллической структуры, на которых достигается наибольший энергетический выигрыш.

6. При движении в объеме сверхпроводника областей неоднородного локального магнитного поля возникает наклон вихрей, приводящий к возникновению дополнительной механической силы, направленной в сторону уменьшения магнитного поля.

7. Экспериментально определены значения коэффициента вязкости при движении вихрей в образцах с разной кристаллической структурой. При магнитном поле 0,2 Тл его величина порядка  $10^{-10}$  Па·с. С ростом силы пиннинга его величина возрастает.

8. В ансамбле вихрей наблюдается релаксационный процесс с диапазоном времен релаксации 120 - 300 с, который обусловлен термоактивированным депиннингом вихрей.

9. Атмосферная деградация иттриевых сверхпроводников снижает энергию активации центров пиннинга, расположенных в межгранулярной среде и в приповерхностных слоях гранул. Это объясняет тот факт, что деградационная устойчивость изотропной керамики существенно ниже, чем у крупнодоменной.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

#### Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Касаткина, Т.И. Магнитодинамика вихрей неоднородного локального магнитного поля в иттриевых сверхпроводниках [Текст] / Т.И. Касаткина, И.М. Голев, Н.Д. Писаренко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Физика и Химия. – Курск, 2013.- №1. - С. 53-61.

2. Голев, И.М. Релаксационные процессы в ансамбле вихрей неоднородного локального магнитного поля в иттриевых сверхпроводниках [Текст] / И.М. Голев, Т.И. Касаткина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Физика и Химия. – Курск, 2013. - №1. - С. 39-44.

3. Милошенко, В.Е. Исследование высокотемпературных сверхпроводников при их вращении в магнитном поле [Текст] / В.Е. Милошенко, Т.И. Касаткина // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. - Т. 77. - №4. - С. 31-34.

#### Статьи и материалы конференций

4. Касаткина, Т.И. Установка для исследования магнитомеханического эффекта высокотемпературных сверхпроводников при их вращении в магнитном поле [Текст] // Сборник материалов VII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». – М.: Интерконтакт наука. – 2010. - С. 143-144.

5. Касаткина, Т.И. Установка для исследования высокотемпературных сверхпроводников в неоднородном магнитном поле [Текст] / Т.И. Касаткина, И.М. Голев // Сборник статей по материалам IX международной заочной научно-практической конференции. (19 августа 2013г.) – Новосибирск: Изд-во «СибАК». - 2013. - С. 54-62.

6. Касаткина, Т.И. Определение величины плотности критического тока иттриевых сверхпроводников при движении в неоднородном магнитном поле [Текст] / Т.И. Касаткина, И.М. Голев // Сборник статей по материалам VII международной заочной научно-практической конференции. – М.: Изд-во «Международный центр науки и образования». - 2013. - С. 26-36.

7. Касаткина, Т.И. Атмосферная деградация сверхпроводящих свойств высокотемпературных сверхпроводников на основе иттрия [Текст] / Т.И. Касаткина, И.М. Голев // Сборник статей по материалам XVI международной заочной научно-практической конференции. – М.: Изд-во «Международный центр науки и образования. - 2013. – С. 8-16.

8. Милошенко, В.Е. Влияние вращения сверхпроводника на динамику магнитного потока [Текст] / В.Е. Милошенко, В.М. Кармазин, Т.И. Касаткина // Сборник материалов Третьей международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». – М.: Интерконтакт наука. - 2009. - Т.1. - С.147-148.

9. Касаткина, Т.И. О магнитомеханическом эффекте классических сверхпроводников в звуковом диапазоне частот [Текст] / Т.И. Касаткина, В.Е. Милошенко // Материалы 50-й научно – технической конференции профессорско – преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов. – Воронеж: ВГТУ. -2010.- С.21.

10. Касаткина, Т.И. Установка для исследования магнитомеханического эффекта в высокотемпературных сверхпроводниках [Текст] / Т.И. Касаткина, В.Е. Милошенко // Материалы 50-й научно – техниче-

ской конференции профессорско– преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов. – Воронеж: ВГТУ. – 2010.- С.20.

#### Патенты

11. Пат. 123973 Российская Федерация. МПК G01R 33/12. Установка для исследования физических и магнитных свойств высокотемпературных сверхпроводников. Касаткина Т.И, заявитель и патентообладатель Касаткина Т.И. - №2012119559/28; заявл. 11.05.2012, опубл. 10.10.2013, Бюл. №1.



Подписано в печать 14.11.2013

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № 228

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14