

На правах рукописи

ЗАХАРОВ Максим Сергеевич

**ПОДАВЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ РЕЛАКСАЦИИ В МАССИВНЫХ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ**

Специальность 01.04.11 – Физика магнитных явлений

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена в лаборатории криогеники и энергетики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук,  
**Смоляк Борис Михайлович**

Официальные оппоненты – **Гощицкий Борис Николаевич**,  
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, главный научный сотрудник лаборатории нейтронных исследований вещества

**Волегов Алексей Сергеевич**,  
кандидат физико-математических наук, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доцент кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится « 29 » октября 2015 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.24 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620000 г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, комн. 248 (зал заседаний диссертационных советов).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан «    » 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, профессор

Овчинников А.С.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Интенсивное изучение свойств высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) обусловлено возможностью создания сверхпроводящих устройств, в которых в качестве хладагента используется жидкий азот. Наиболее перспективные направления практического использования массивных ВТСП связаны с разработкой систем магнитной левитации, а также с созданием источников сильного магнитного поля. Необходимым условием устойчивой работы этих устройств является неизменность основных параметров: величины индукции магнитного поля, создаваемого сверхпроводящим источником, и силы, удерживающей заданный вес в системе магнитной левитации. Почти сразу же после открытия высокотемпературной сверхпроводимости было обнаружено, что в отличие от классических низкотемпературных сверхпроводников в ВТСП наблюдается сильная магнитная релаксация (крип магнитного потока), которая приводит к деградации сверхтоков со временем. Это накладывает ограничения на практическое применение ВТСП материалов. Поэтому проблемы разработки и эксплуатации сверхпроводящих устройств тесно связаны с решением проблемы крипа.

В настоящее время имеется большое число публикаций, посвященных экспериментальному и теоретическому исследованию явления «гигантского» крипа магнитного потока в ВТСП. Разработаны теории и модели, которые хорошо качественно и количественно описывают механизм данного явления. Однако лишь в немногих работах уделяется внимание воздействию на скорость магнитной релаксации. Кроме того, известные методы подавления крипа трудно применить на практике. В этой связи поиск и разработка новых методов замедления или полного подавления магнитной релаксации являются актуальными и представляют значительный научный и практический интерес.

### **Цель работы и задачи исследования**

Целью настоящей диссертационной работы является исследование новых способов воздействия на скорость крипа магнитного потока в массивных ВТСП, разработка методов подавления магнитной релаксации и изучение эффекта замедления релаксации подъемной силы в сверхпроводниковой системе левитации.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Разработать автоматизированный комплекс для наблюдения релаксации локальной магнитной индукции на поверхности сверхпроводника.
- 2) Измерить скорости релаксации распределений магнитной индукции при захвате потока и при помещении сверхпроводника вблизи ферромагнетика или в неоднородное магнитное поле.
- 3) Экспериментально изучить релаксации подъемной силы в системе левитации.
- 4) Измерить скорость релаксации высоты левитации в системе сверхпроводник/магнит при разной весовой нагрузке.

- 5) Рассчитать критические состояния, возникающие в сверхпроводнике в присутствии ферромагнетика, при наложении внешнего неоднородного магнитного поля и в условиях левитации.

### **Научная новизна работы**

- 1) Исследован новый эффект воздействия внешнего неоднородного магнитного поля на скорость магнитной релаксации. Впервые введены в рассмотрение магнитные силы, действующие на концы вихрей, которые в зависимости от направления внешнего поля могут замедлять или ускорять магнитную релаксацию.
- 2) Впервые выполнены расчеты токовых структур в намагниченном сверхпроводнике при его помещении вблизи ферромагнетика или в неоднородное магнитное поле, подтверждающие гипотезу о встречных силах Лоренца, которые замедляют диффузию вихрей.
- 3) Впервые экспериментально установлено, что в сверхпроводниковой системе левитации релаксация подъемной силы возникает только в случае, когда на объект левитации наложена механическая связь; в условиях реальной левитации подъемная сила не изменяется со временем.

### **Фундаментальная и практическая значимость работы**

Исследованы новые способы воздействия на скорость магнитной релаксации в ВТСП, которые могут быть использованы при разработке сверхпроводниковых технологий, в частности, источников сильного магнитного поля и систем левитации.

### **Соответствие содержания диссертации паспорту специальности**

Содержание диссертационной работы соответствует формуле паспорта специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений: «... область науки, занимающаяся изучением: взаимодействий веществ и их структурных элементов..., обладающих магнитным моментом, между собой или с внешними магнитными полями; явлений, обусловленных этими взаимодействиями...» и области исследований п. 2 «Экспериментальные исследования магнитных свойств и состояний веществ различными методами ..., выявление закономерностей их изменения под влиянием различных внешних воздействий».

### **Личный вклад автора**

Автор лично принимал участие в разработке, изготовлении и автоматизации экспериментальных установок, в проведении измерений, в обсуждении и интерпретации полученных результатов, написании статей. Автором лично была выполнена обработка экспериментальных данных и сделаны все численные расчеты.

### **На защиту выносятся:**

- 1) Экспериментальные результаты по подавлению магнитной релаксации в намагниченном сверхпроводнике, помещенном вблизи ферромагнетика или в неоднородное магнитное поле.
- 2) Результаты численного расчета, показывающие, что в сверхпроводнике устанавливается биполярная токовая структура, при которой на разные участки вихрей действуют встречные силы Лоренца.
- 3) Во внешнем неоднородном магнитном поле помимо сил Лоренца на вихри действуют магнитные силы, которые в зависимости от направления внешнего поля замедляют или ускоряют крип магнитного потока.
- 4) Методика сравнительного эксперимента, позволяющая выявить влияние крипа на подъемную силу в системе левитации сверхпроводник/магнит.
- 5) Результаты измерения высоты левитации сверхпроводника над постоянным магнитом в зависимости от времени при различной весовой нагрузке.
- 6) В сверхпроводниковых системах левитации релаксация подъемной силы возникает только при фиксированном положении объекта левитации; в случае реальной левитации (когда вес тела уравнивается только магнитной силой) подъемная сила не изменяется со временем.

### **Достоверность научных результатов**

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, определяется использованием широко применяемых надежных экспериментальных методов, воспроизводимостью результатов при повторных измерениях, согласием полученных данных с результатами численных расчетов, а также с экспериментальными данными, известными из литературы.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях:

- 1) 2<sup>nd</sup> International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM-2010), 25 – 30 April 2010, Antalya, Turkey;
- 2) XI Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-11), 15 – 21 ноября 2010 г., Верхняя Сысерть, Свердловская обл.;
- 3) 3<sup>rd</sup> International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM-2012), 29 April – 4 May 2012, Istanbul, Turkey;
- 4) 4<sup>nd</sup> International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM-2014), 27 April – 2 May 2014, Antalya, Turkey.

## Публикации

Материалы диссертации изложены в 5 статьях, опубликованных в ведущих зарубежных научных журналах, входящих в перечень ВАК, и в международном сборнике, а также в тезисах докладов на конференциях.

## Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, библиографического списка. Общий объем диссертации составляет 100 страниц, включая 43 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 111 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, определены цели исследования, сформулированы основные результаты работы и их научная новизна.

**В первой главе** даются основные понятия, характеризующие процесс магнитной релаксации. Приводится обзор известных методов воздействия на скорость крипа магнитного потока в высокотемпературных сверхпроводниках.

**Во второй главе** рассматривается эффект подавления магнитной релаксации в массивном ВТСП при сближении сверхпроводника, в котором захвачен магнитный поток, с ферромагнетиком. Впервые данный эффект наблюдался в работе [1]. Авторы предположили, что замедление крипа потока связано с действием встречных сил Лоренца. В настоящей диссертационной работе было проведено более детальное экспериментальное исследование данного эффекта и выполнены численные расчеты, которые подтверждают предложенную в [1] гипотезу.

Для измерения скорости магнитной релаксации использовались миниатюрные датчики Холла, размещенные на поверхности ВТСП. В экспериментах использовался дисковый ВТСП образец диаметром 20 мм и высотой 8,5 мм из плавленной текстурированной керамики  $YBa_2Cu_3O_7$ . Температура перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c = 91$  К, ширина перехода  $\sim 1$  К, ось  $c$  направлена нормально к плоскости диска; плотность критического тока  $J_c = 2,7 \cdot 10^7$  А/м<sup>2</sup> (при  $T = 77$  К).

Для намагничивания ВТСП образца использовался компактный электромагнит броневого типа. Электромагнит имел цилиндрические полюса диаметром 40 мм, которые можно было перемещать для изменения зазора, и кольцевой магнитопровод, замыкающий магнитную цепь. Конструкция электромагнита позволяла вписаться в габариты криостата с диаметром горловины 15 см и погрузить источник внешнего магнитного поля в жидкий азот. В зазоре шириной 10 мм создавалось магнитное поле с индукцией  $B_{эл}$  до 1,2 Тл. Пять датчиков Холла, расположенные по радиусу диска на его плоской поверхности, регистрировали нормальную составляющую магнитной

индукции, которая определяет локальную плотность вихрей. Погрешность измерения индукции не превышала 0,02 мТл. Приводится описание автоматизированной системы сбора данных, которая позволяет получать сигнал одновременно со всех датчиков в режиме реального времени.

Были проведены три независимых опыта (рис. 1) для исследования влияния ферромагнетика на скорость крипа захваченного в ВТСП магнитного потока. Для захвата потока использовался режим намагничивания *field cooled*.

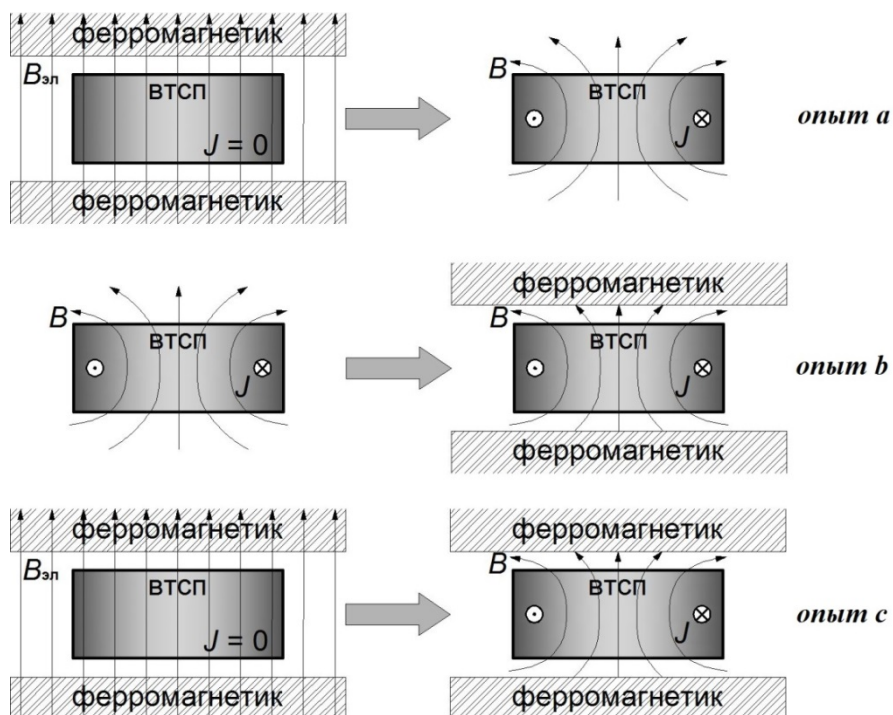


Рис. 1. Намагничивание ВТСП образца (а), сближение намагниченного ВТСП с ферромагнетиком (б), намагничивание ВТСП в присутствии ферромагнетика (с).

**Опыт а.** ВТСП, имеющий температуру выше критической, помещали в зазор электромагнита в магнитное поле с индукцией  $B_{эл} \approx 1$  Тл, при которой критическое состояние в данном образце устанавливается во всем объеме. В центральной области зазора, где помещался образец поле  $B_{эл}$  было практически однородным ( $B_{эл} \perp$  оси  $c$ ). В этом положении образец охлаждался до 77 К (переходил в сверхпроводящее состояние), после чего ток в обмотках электромагнита выключали и сверхпроводник удаляли из зазора. В результате ВТСП приобретал максимальную намагниченность, т.е. сверхток протекал по всему объему образца. Плотность захваченного магнитного потока  $B$  измеряли в разных точках на поверхности ВТСП образца в зависимости от времени.

**Опыт б.** Образец, захвативший магнитный поток, сближался с ферромагнетиком. В качестве ферромагнитной среды использовалась система электромагнита (при выключенных обмотках). После внесения сверхпроводника в зазор между ферромагнетиками снимались релаксационные зависимости.

**Опыт с.** Образец намагничивался путем выключения электромагнита, и в этой позиции производились измерения индукции со временем.

По измеренным значениям индукции построены профили магнитного потока, захваченного в ВТСП, и их изменение с течением времени. В *опыте а* (рис. 2) магнитный поток уменьшался со временем. В *опыте б* профиль потока оставался неизменным в течение длительного времени. Максимальная продолжительность наблюдения данного эффекта составила ~ 24 часа. В течение этого времени не было замечено никаких изменений в распределении плотности потока.

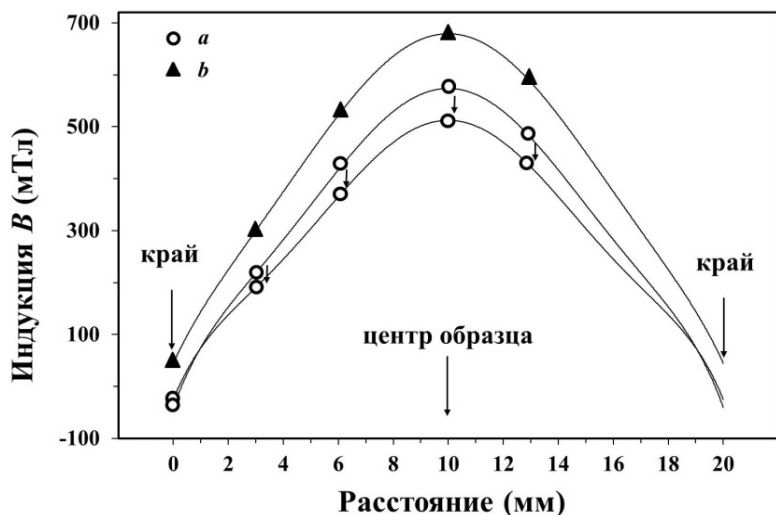


Рис. 2. Индукция, измеренная на поверхности сверхпроводника: в отсутствие ферромагнетика - *а* и при сближении намагниченного ВТСП с ферромагнетиком - *б*. Данные получены спустя 2 мин и 100 мин после начала измерений.

На рис. 3 показано, как изменяется индукция в центре диска после намагничивания образца без ферромагнетика и после его сближения с ферромагнетиком. До сближения в сверхпроводнике наблюдается обычная сильная магнитная релаксация; при сближении с ферромагнетиком происходит скачок индукции, и магнитная релаксация прекращается. Такие же зависимости наблюдались и на других (нецентральных) датчиках Холла.

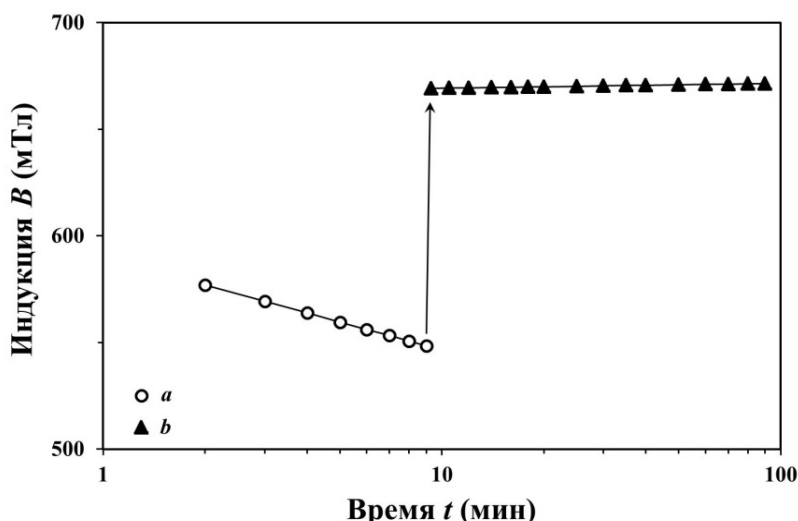


Рис. 3. Прекращение магнитной релаксации при сближении намагниченного образца с ферромагнетиком.

В *опыте с* наблюдается уменьшение со временем захваченного в сверхпроводнике магнитного потока (рис. 4).



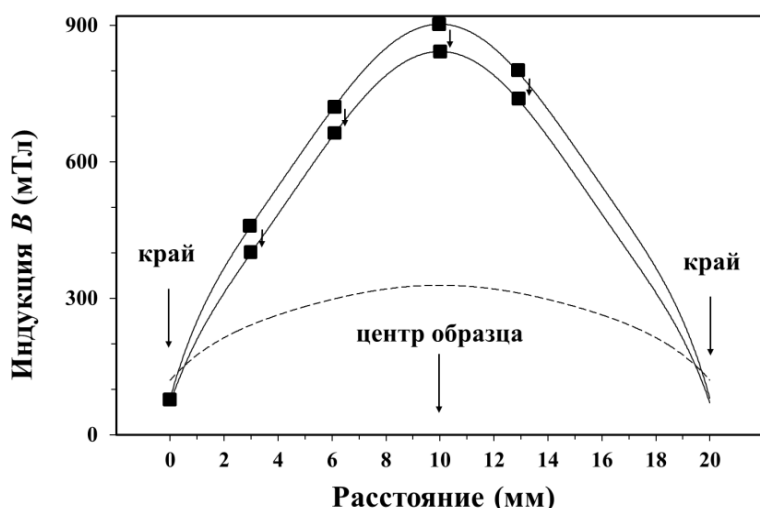


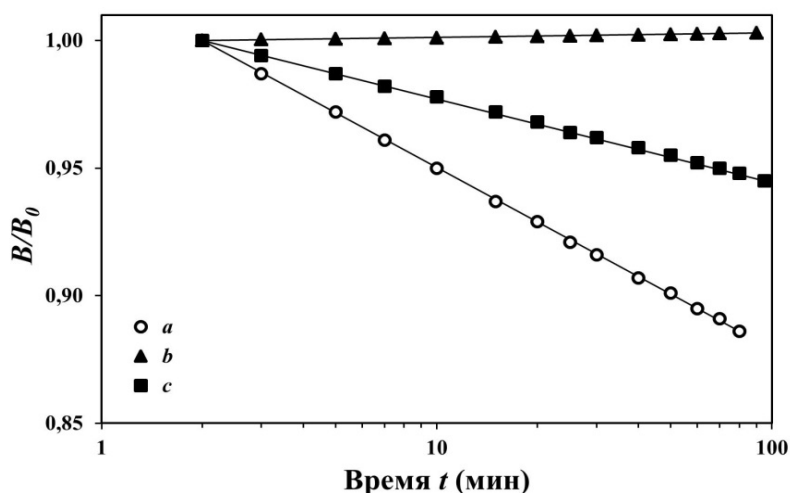
Рис. 4. Профили магнитного потока при намагничивании ВТСП вблизи ферромагнетика спустя 2 мин и 100 мин после начала измерений. Пунктирной линией показан профиль собственного поля, создаваемого ферромагнетиком на поверхности ВТСП образца (определяется как разность распределений индукции в *опытах а и с*).

Временные зависимости индукции, нормированные на величину начальной индукции  $B_0 \equiv B(t_0)$ , в *опытах а, б и с* показаны на рис. 5 (начало измерений  $t_0 = 2$  мин). Угол наклона этих зависимостей определяет нормированную скорость логарифмической релаксации:

$$S = \frac{1}{B_0} \frac{dB(t)}{d \ln t} = - \frac{kT}{U_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{eff}}$  - эффективная энергия активации.

В отсутствие каких-либо внешних воздействий на намагниченный сверхпроводник (*опыт а*)  $S = 0,031$ , что дает величину нормированной на  $kT$  эффективной энергии активации  $1/S = 32$ . Это совпадает с известными значениями  $U_{\text{eff}}/kT$  для



плавленной текстурированной керамики YBCO [2].

Рис. 5. Нормированные релаксационные зависимости индукции в центре образца в отсутствие ферромагнетика – *а*, при сближении с ферромагнетиком – *б* и намагничивание в присутствии ферромагнетика – *с*.

Присутствие ферромагнетика существенно влияет на скорость магнитной релаксации. Величина эффекта зависит от последовательности намагничивания и сближения ВТСП образца с ферромагнетиком. Если сближение происходит до намагничивания сверхпроводника, т.е. образец намагничивается в присутствии ферромагнетика (*опыт с*), то скорость релаксации становится в два раза меньше, чем в эксперименте без ферромагнетика (*а*). Когда ферромагнетик сближается с уже намагниченным сверхпроводником (*б*), магнитная релаксация полностью подавляется.

Как отмечено выше, подавление магнитной релаксации при сближении с ферромагнетиком объясняли [1] появлением встречных сил Лоренца. Для подтверждения этой гипотезы был проведен численный расчет критического состояния в сверхпроводнике методом конечных элементов. Алгоритм расчета аналогичен схеме, предложенной в [3]. В расчете использовалась модель критического состояния Бина [4], в которой постулируется, что плотность тока в сверхпроводнике равна критической  $J = J_c$  и не зависит от величины магнитной индукции, а любые изменения в распределении магнитного потока в образце начинаются на границе сверхпроводника. Электромагнитное поведение сверхпроводника моделировалось вольт-амперной характеристикой (ВАХ) вида

$$E_\varphi = E_c \left( J_\varphi / J_c \right)^n \quad (2)$$

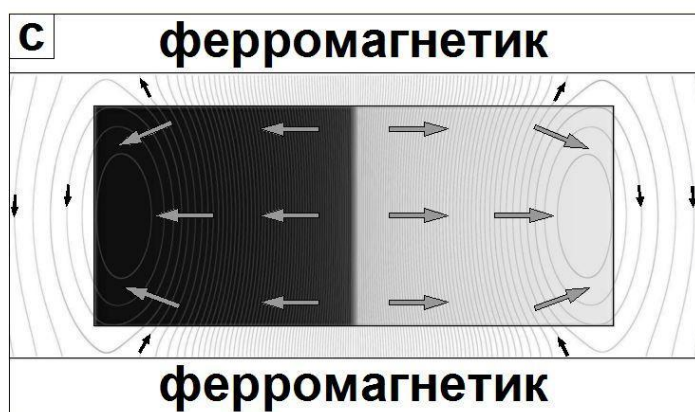
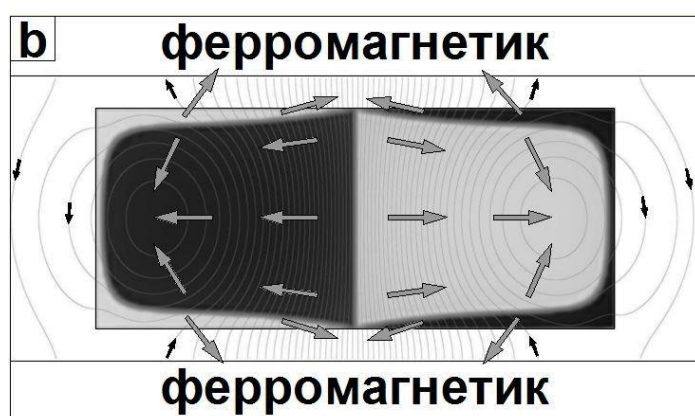
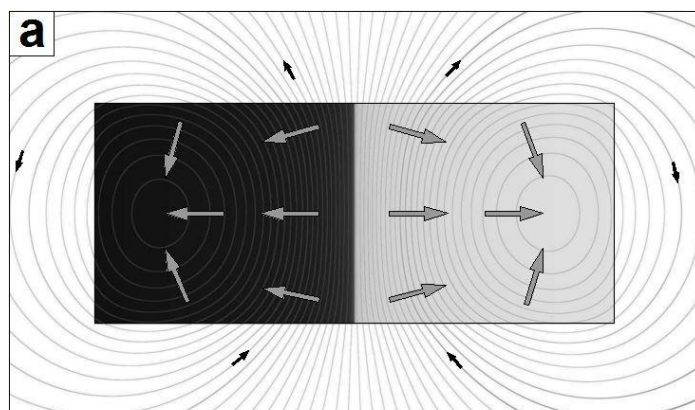
где  $J_\varphi$  и  $E_\varphi$  – плотность тока и индуцируемое электрическое поле,  $E_c = 10^{-4}$  – критическое значение напряженности электрического поля; показатель  $n = 21$  характеризует силу пиннинга в сверхпроводнике (использовались значения констант, характерные для плавленной текстурированной керамики YBCO [5]). ВАХ вместе с уравнениями Максвелла составляли систему дифференциальных уравнений в частных производных. Задавались также начальные и граничные условия, которые определяли режим намагничивания.

Моделирование ферромагнетика производилось с использованием метода зеркальных изображений. В расчете предполагалось, что ферромагнетики занимают полубесконечное пространство (сверху и снизу), а сверхпроводник находится в зазоре между ними. Намагниченность ферромагнетика заменялась системой токов-изображений, которые в каждый момент времени в течение всего процесса намагничивания в точности соответствовали сверхтокам в образце; их распределение было симметрично относительно границы ферромагнетика. Каждый из ферромагнетиков должен отображать не только токи в сверхпроводнике, но и токи-изображения в ферромагнетике напротив. В идеале ферромагнетики будут бесконечно отображать токи друг друга. Численные расчеты показали, что вполне достаточно ограничиться двумя отображениями для каждого ферромагнетика.

На рис. 6 представлены рассчитанные распределения магнитного поля и плотности сверхпроводящего тока в ВТСП образце. Полученные распределения можно рассматривать как начальные критические состояния, которые устанавливаются в сверхпроводнике перед началом измерения скорости магнитной релаксации.

Критическое состояние, которое устанавливалось в *опыте а*, характеризуется тем, что токи в сверхпроводнике циркулируют в одном направлении, т.е. токовая структура является *униполярной*. Подобная конфигурация вихревой структуры в отсутствие внешних воздействий была получена аналитически в работе [6]. Под действием сил Лоренца происходит диффузия вихрей из областей с большей плотностью вихрей в области, где эта плотность меньше.

В *опыте b* при приближении к сверхпроводнику, захватившему магнитный поток, ферромагнетик намагничивается и становится источником собственного магнитного поля (показано пунктирной линией на рис. 4).

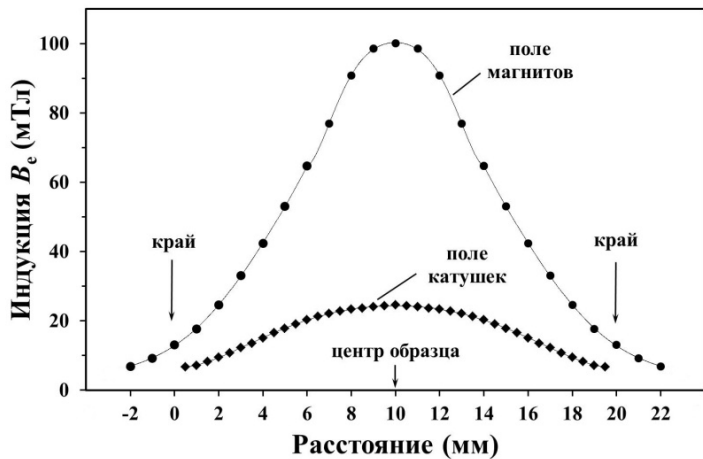


Проникая в образец, собственное поле ферромагнетика индуцирует токи, текущие в обратном направлении по сравнению с токам захвата. В образце устанавливается *биполярная* токовая структура. Обратные токи, циркулируют преимущественно вблизи оснований дискового ВТСП, на которые выходят концы вихрей. В этих областях силы Лоренца направлены в противоположную сторону, т.е. препятствуют движению вихрей в области с меньшей их плотностью. Такое силовое воздействие на разные участки одних и тех же вихрей способно эффективно тормозить процесс крипа магнитного потока в ВТСП.

Рис. 6. Распределения магнитной индукции и плотности токов в сверхпроводнике в *опытах a, b* и *c*. Направление циркуляции токов: в плоскость листа - светлые области образца, из плоскости листа – темные области. Черные стрелки указывают направление магнитного поля, серые стрелки – направление сил Лоренца  $F_L$ , действующих на вихри.

Критическое состояние в *опыте c* устанавливалось при намагничивании сверхпроводника в присутствии ферромагнетика. В момент выключения тока электромагнита магнитное поле в сверхпроводнике и ферромагнетике изменяется только в одном направлении (уменьшается). Поэтому токи, наводимые в сверхпроводнике, циркулируют тоже только в одном направлении. Данная униполярная структура должна релаксировать, что и наблюдается в эксперименте (см. рис. 4). Снижение скорости релаксации при этом по сравнению с *опытом a* (см. зависимости *a* и *c* на рис. 5) не связано со встречно направленными силами Лоренца. Возможное объяснение замедления релаксации в *опыте c* представлено в следующей главе.

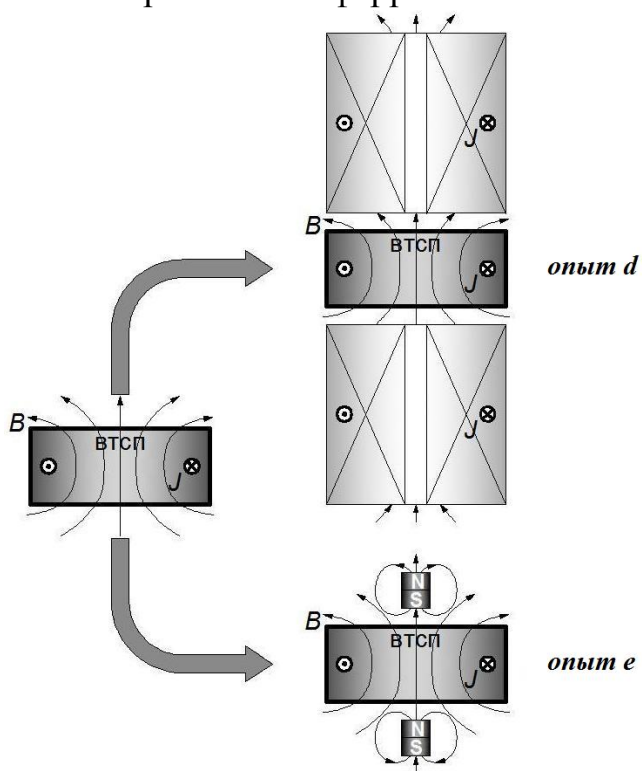
В третьей главе исследуется воздействие неоднородного магнитного поля на скорость магнитной релаксации в ВТСП. В качестве источников неоднородного поля использовались катушки постоянного тока и SmCo магниты. Катушки имели внешний диаметр – 20 мм, внутренний – 3 мм, высоту – 30 мм. Размеры магнитов: диаметр – 8 мм, высота – 5 мм. Расстояние между катушками 12 мм, между постоянными магнитами 15 мм. Профили магнитных



полей, создаваемых катушками и магнитами на поверхности сверхпроводника, показаны на рис. 7.

Рис. 7. Радиальные распределения нормальной составляющей магнитной индукции поля, создаваемого катушками и постоянными магнитами на поверхности образца.

Намагничивание сверхпроводника осуществлялось таким же образом, как и в экспериментах с ферромагнетиком. После намагничивания по типу *опыта а*



образец с захваченным магнитным потоком помещали в поле катушек (*опыт d*, рис. 8) или постоянных магнитов (*e*). Направления магнитных полей катушек и магнитов совпадали с направлением намагниченности ВТСП образца. Величина локальной индукции измерялась в зависимости от времени.

Рис. 8. Помещение намагниченного ВТСП в неоднородное магнитное поле катушек (*d*) или постоянных магнитов (*e*).

Результаты экспериментов показали (рис. 9), что внесение намагниченного сверхпроводника в неоднородное магнитное поле вызывает скачок индукции на поверхности сверхпроводника и *полное подавление магнитной релаксации*. В случае катушек полное подавление магнитной релаксации наблюдается в течение ~ 60 мин, после чего индукция начинала уменьшаться. В *опыте e* с постоянными магнитами максимальное время

наблюдения составляло 8 часов. При этом никаких изменений индукции не было обнаружено. *Стабилизация захваченного в сверхпроводнике магнитного потока внешним магнитным полем тем эффективней, чем больше неоднородность и величина внешнего поля.*

Воздействие внешнего неоднородного поля на магнитную релаксацию в сверхпроводнике подобно воздействию ферромагнетика (см. рис. 3), что указывает на общую природу этих явлений.

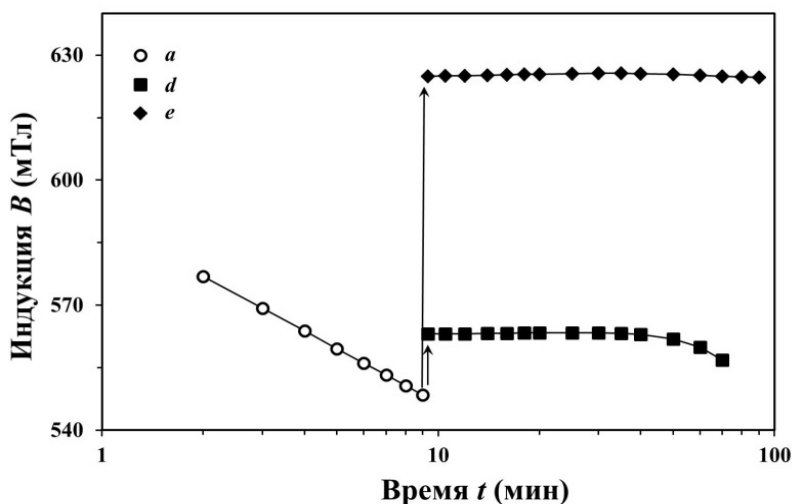


Рис. 9. Релаксация магнитной индукции ( $a$ ) и ее подавление после внесения намагниченного образца в поле катушек ( $d$ ) или постоянных магнитов ( $e$ ). Данные представлены для центральной области на поверхности дискового образца.

Выполнен расчет токовой структуры в намагниченном сверхпроводнике, помещенном в неоднородное магнитное поле. Приводится процедура расчета. Поле постоянных магнитов было рассчитано методом эквивалентного соленоида. Результаты численного расчета критического состояния в сверхпроводнике представлены на рис. 10.

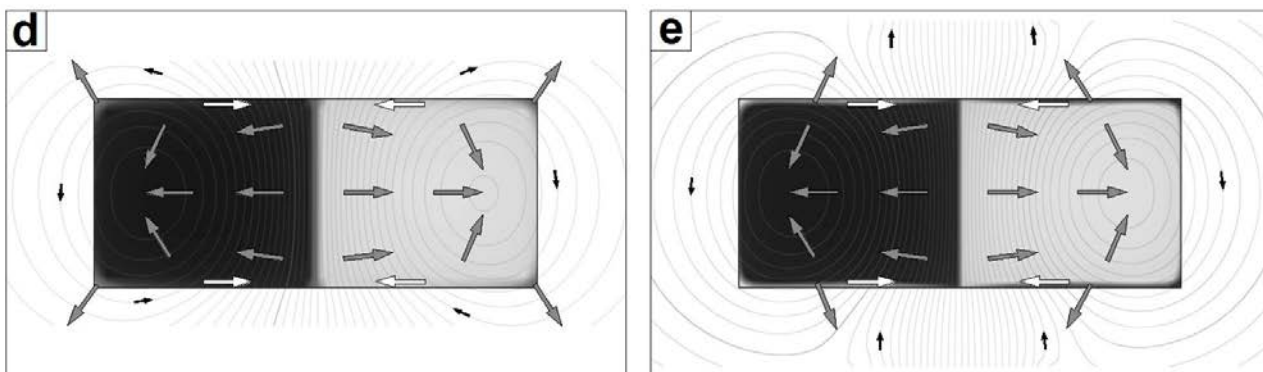


Рис. 10. Распределения магнитной индукции и плотности токов в сверхпроводнике при его внесении в поле катушек ( $d$ ) и магнитов ( $e$ ). Направление циркуляции токов: в плоскость листа - светлые области, из плоскости листа – темные области. Черные стрелки указывают направление магнитного поля, серые стрелки – направление сил Лоренца  $F_L$ . Белыми стрелками показано направление магнитных сил  $f_{mv}$ , действующих на концы вихрей со стороны внешнего неоднородного поля.

Как и в *опыте b* с ферромагнетиком, в опытах с неоднородным полем возникает биполярная токовая структура. Хотя в случае постоянных магнитов область обратных токов возникает на меньшей глубине, чем в опыте с ферромагнетиком (рис. 6,  $b$ ), однако подавление магнитной релаксации весьма эффективно.

При воздействии на образец поля катушек области обратных токов занимают лишь угловые участки, поэтому воздействие встречных сил Лоренца испытывают только вихри, проходящие через эти участки. В этом случае наблюдаемую в центре ВТСП стабилизацию индукции (хотя и кратковременную) трудно объяснить с помощью встречных сил Лоренца, действующих только на периферии сверхпроводящего диска.

Вводится в рассмотрение магнитная сила, действующая на концы вихрей в неоднородном магнитном поле, - сила, которая ранее не учитывалась, но которая также должна влиять на скорость магнитной релаксации. В работе [7] было продемонстрировано, что при сканировании поверхности сверхпроводника иглой магнитно-силового микроскопа происходит смещение конца вихря вслед за иглой. Подобное воздействие на концы вихрей должен оказывать любой источник внешнего неоднородного магнитного поля.

Текстурированные ВТСП образцы обладают сильной анизотропией. В частности, вихревые токи, циркулирующие вокруг нитей потока, протекают в сверхпроводящих плоскостях  $a-b$ , образуя токовые «блины» [8], которые можно рассматривать как плоские витки с током. Во внешнем магнитном поле  $\mathbf{B}_e$  виток с током (предполагается, что основное влияние оказывается на «крайний» приповерхностный виток) испытывает действие сил и вращающих моментов. Считая, что внешнее поле в области занятой током меняется слабо, выражение для действующей на виток магнитной силы имеет вид:

$$\mathbf{f}_m = \text{grad}(\mathbf{p}_m \cdot \mathbf{B}_e), \quad (3)$$

где  $\mathbf{p}_m$  - магнитный момент витка с током.

В сверхпроводнике витки с током (на которые действует внешнее поле) перемещаются по плоским поверхностям диска в радиальном направлении; их магнитный момент имеет только  $z$ -компоненту  $p_{mz}$ . На движение витка с током по поверхности будет влиять только радиальная компонента силы

$$f_{mr} = p_{mz} \frac{\partial B_{ez}}{\partial r} \quad (4)$$

Для постоянных магнитов радиальное распределение градиента  $\partial B_{ez}/\partial r$  на поверхности сверхпроводника показано на рис. 11.

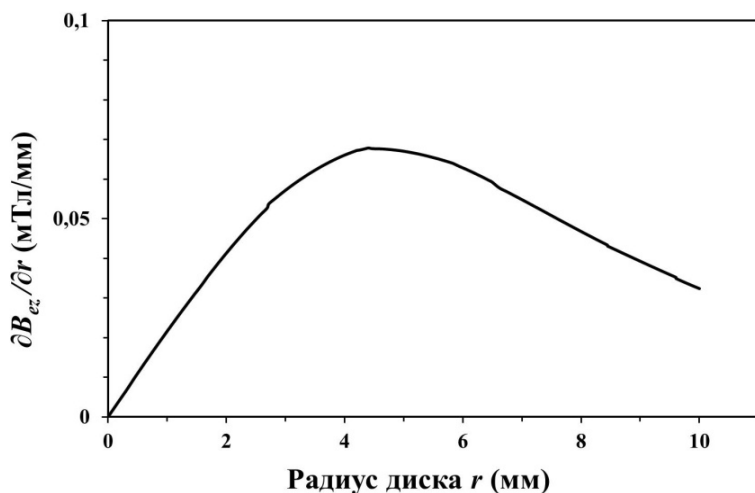


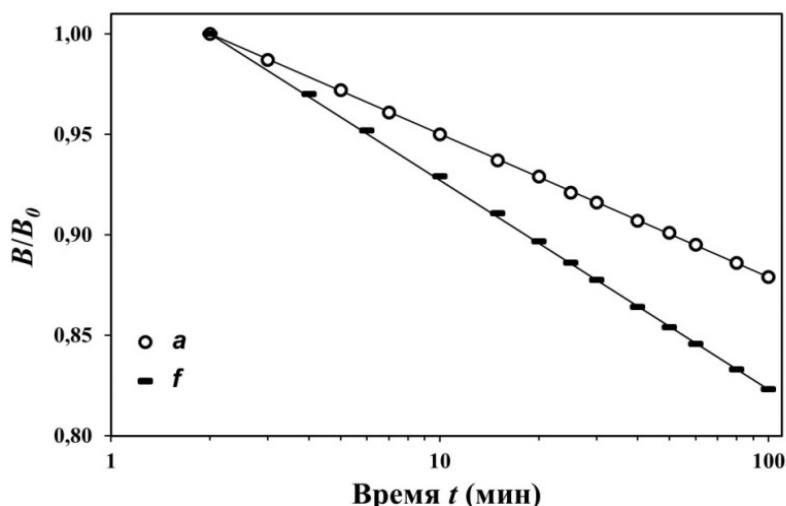
Рис. 11. Радиальное распределение градиента индукции  $\partial B_{ez}/\partial r$  внешнего поля, создаваемого магнитами, на поверхности сверхпроводника.

Такой же вид имеет распределение радиальной силы, действующей на приповерхностный виток с током, т.е. на конец вихря. Так как в *опыте e* магнитный момент  $p_m$  и индукция поля  $B_{ez}$  совпадают по направлению, то магнитные силы  $f_{mv}$ , действующие на концы вихрей, направлены в область с большей индукцией, т.е. к центру диска. На рис. 10 эти силы показаны белыми стрелками. В том же направлении на вихри действуют встречные силы Лоренца. Как отмечалось выше, встречные силы Лоренца действуют на участки вихрей вблизи плоских поверхностей сверхпроводящего диска. В отличие от сил Лоренца в объеме сверхпроводника, которые инициируют срыв и движение вихрей, магнитные силы и встречные силы Лоренца тормозят крип потока, что и наблюдается в опыте с магнитами. Остановка релаксации (хотя и не долгая) в *опыте d* в основном связана, по-видимому, с действием магнитных сил.

Учет магнитного силового воздействия на концы вихрей позволяет объяснить также замедленную магнитную релаксацию при намагничивании сверхпроводника вблизи ферромагнетика (*опыт b*).

В опытах с источниками внешнего неоднородного поля направление этого поля, а, следовательно, и направление радиальной составляющей магнитной силы (4) можно изменить на противоположное. В этом случае вместо притяжения к центру диска, концы вихрей будут выталкиваться из центральной области. Это должно приводить к облегчению диффузии вихрей и ускорению крипа захваченного магнитного потока. Этот опыт (*f*) также был проведен.

На рис. 12 представлены релаксационные зависимости для индукции в центре образца при релаксации в отсутствие внешних магнитных полей (*a*) и в случае наложения встречного внешнего поля (*f*). Можно видеть, что при наложении встречного поля скорость релаксации возросла в сравнении с релаксацией в *опыте a*.



скорость релаксации возросла в сравнении с релаксацией в *опыте a*.

Рис. 12. Нормированные релаксационные зависимости индукции в центре образца в *опытах a* и *f*.

Расчет критического состояния в *опыте f* показывает (рис. 13), что в образце устанавливается униполярная структура без встречной циркуляции токов. Силы Лоренца на всех участках инициируют диффузию вихрей из центра (где их плотность выше) к периферии диска. Туда же, в область с меньшей плотностью вихрей, направлены магнитные силы. Ускорение релаксации, наблюдаемое в *опыте f*, демонстрирует действие этих сил.

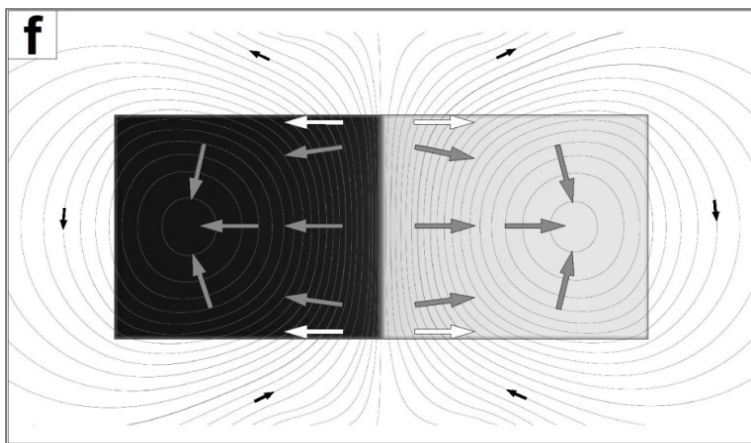


Рис. 13. Критическое состояние в сверхпроводнике в опыте *f*. Направление токов: в плоскость листа - светлые области, из плоскости - темные области. Черные стрелки указывают направление магнитного поля, серые стрелки - направление сил Лоренца  $F_L$ , белые стрелки - направление магнитных сил  $f_{mr}$ , действующих на концы вихрей со стороны внешнего неоднородного поля.

В четвертой главе исследуется релаксация подъемной силы в системе сверхпроводник/магнит.

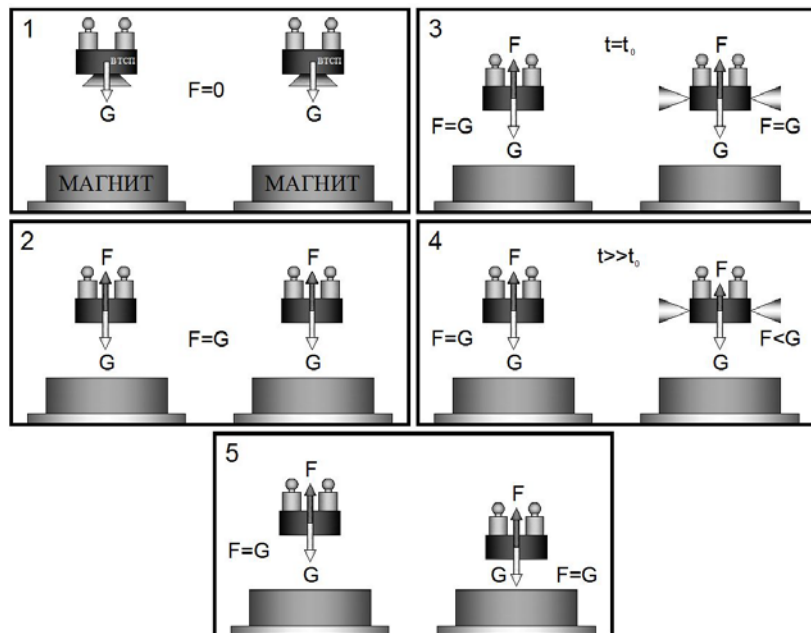
Крип магнитного потока приводит к затуханию сверхтоков. Поэтому намагниченность сверхпроводников, а, следовательно, и подъемная сила *должна* уменьшаться со временем. Однако результаты экспериментального исследования этого явления неоднозначны. Опыты с непосредственным измерением силы взаимодействия между сверхпроводником и магнитом показывают уменьшение магнитной силы со временем. В то время как при наблюдении дрейфа левитирующего ВТСП высота левитации не уменьшалась [9, 10]. Авторы работы [11] предположили, что в системе левитации, когда ВТСП (или магнит) удерживается только магнитным полем, снижение намагниченности происходит гораздо медленнее, чем в системе с ограниченной подвижностью объекта левитации. Такое ограничение существует в опытах с измерением силы от времени, так как для измерения силы необходим контакт с телом, на которое действует эта сила; т.е. при наблюдении релаксации на объект левитации наложена механическая связь. Скорость релаксации силы максимальна, когда связь абсолютно жесткая, т.е. относительное положение магнита и сверхпроводника зафиксировано. Релаксация силы в данном случае обусловлена «гигантским» крипом магнитного потока, который как раз и наблюдается при фиксированном положении сверхпроводника и источника магнитного поля. При смягчении механической связи скорость релаксации силы уменьшается. Эластичная механическая связь восстанавливает характерную для левитации чувствительность сверхпроводника к малым перемещениям относительно магнита. Однако воспроизвести полностью условия левитации в опытах с измерением силы не удастся. Контакт с телом, которое должно левитировать, нарушает принцип магнитной левитации, согласно которому левитирующее тело должно удерживаться только магнитным полем. Поэтому вопрос о релаксации силы в условиях реальной левитации в экспериментальном плане был пока не решен.

В данной главе представлено экспериментальное исследование релаксации подъемной магнитной силы в условиях реальной левитации ВТСП. Полученные результаты тесно связаны с результатами работы [11], являясь, по сути, недостающим звеном.



При левитации подъемная магнитная сила  $F$  всегда равна весу  $G$  левитирующего объекта. Поэтому судить об изменении силы  $F$  не нарушая принцип левитации, можно лишь косвенно, измеряя высоту левитации в зависимости от времени. Основная идея эксперимента отражена на рис. 14.

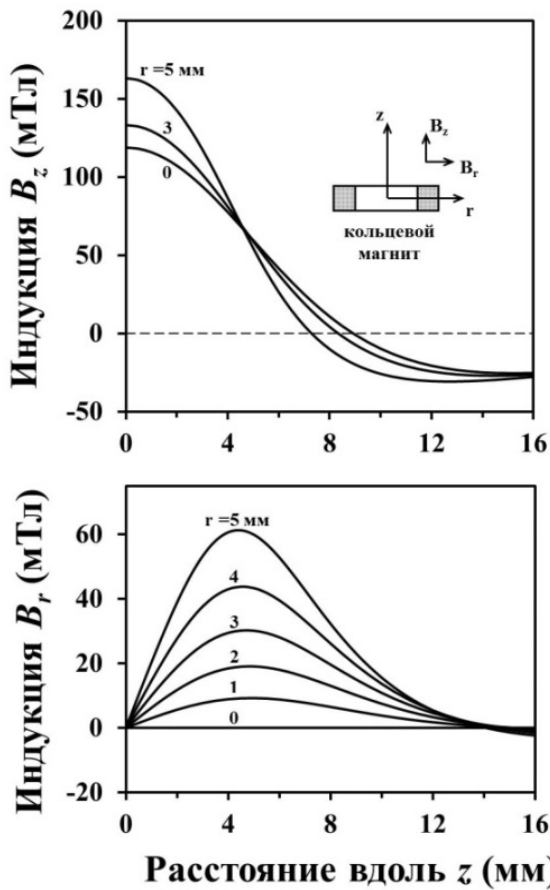
Допустим, что крип подъемной силы в условиях реальной левитации отсутствует или идет крайне медленно, в то время как фиксация положения левитирующего объекта



левитирующего объекта (наложение механической связи) резко активизирует процесс крипа. Тогда в опыте должен наблюдаться следующий эффект.

Рис. 14. В условиях реальной левитации расстояние между ВТСП образцом и постоянным магнитом не изменяется во времени. Однако если зафиксировать объект левитации на некоторое время, а затем убрать механическую связь, то высота левитации уменьшается.

На первом кадре (рис. 14) показаны две идентичные системы сверхпроводник/магнит, в которых сверхпроводники, нагруженные одинаковым весом  $G$ , находятся на одном и том же расстоянии от постоянных магнитов. ВТСП не намагничены, т.е. подъемные силы  $F$  отсутствуют. Когда опора с образцом начинает опускаться, в сверхпроводнике наводится ток и на образец начинает действовать сила  $F$ , которая по мере сближения ВТСП и магнита увеличивается, пока не уравнивает вес  $G$ . Кадр 2 иллюстрирует левитацию ВТСП образцов. В этой позиции подъемные силы и уровни подвеса одинаковы и практически не меняются со временем в силу сделанного выше допущения об отсутствии релаксации при левитации. Зафиксируем теперь положение одного из ВТСП, не сдвигая его с уровня подвеса. Кадр 3 показывает, что на ВТСП образец справа наложена жесткая механическая связь, а образец слева продолжает левитировать. Кадр 4 показывает системы ВТСП/магнит в той же позиции, что и на кадре 3 (те же уровни подвеса), но спустя время  $t \gg t_0$ . За это время высота левитации слева осталась прежней ввиду отсутствия релаксации силы  $F$ . ВТСП справа находится на том же уровне, где он был зафиксирован, но сила  $F$  в системе справа *должна* уменьшаться вследствие сильного крипа потока, который, согласно сделанному выше допущению, существует в зафиксированном сверхпроводнике. После снятия фиксации ВТСП справа смещается ближе к постоянному магниту и подмагничивается, восстанавливая баланс между  $F$  и  $G$ . В результате высота левитации в системе справа оказывается меньше, чем в системе слева (кадр 5).



Описана экспериментальная установка для измерения высоты левитации сверхпроводника в зависимости от времени. В экспериментах использовался дисковый ВТСП диаметром 10 мм и высотой 3,5 мм из плавленной текстурированной керамики  $YBa_2Cu_3O_7$  и кольцевой магнит SmCo с размерами  $30 \times 18 \times 8$  мм (профили поля кольцевого магнита представлены на рис. 15). Температура перехода образца в сверхпроводящее состояние  $T_c = 91$  К, ширина перехода  $\sim 1$  К, ось  $c \perp$  плоскости диска; плотность критического тока  $J_c = 2,4 \cdot 10^7$  А/м<sup>2</sup> (при  $T = 77$  К).

Рис. 15. Аксиальная и радиальная компоненты поля кольцевого магнита. Распределения получены путем численного расчета с использованием реперных значений величины магнитного поля, измеренных датчиком Холла.

Были проведены эксперименты с разными весовыми нагрузками  $G$ . ВТСП намагничивался в режиме *field cooled* при разных начальных расстояниях  $z_0$  между образцом и магнитом. Для каждой весовой нагрузки выполнялись две серии опытов:

**Серия опытов № 1.** После охлаждения образца производилось плавное приближение магнита к сверхпроводнику, в результате ВТСП намагничивался, и на образец действовала подъемная сила  $F$ , которая возрастала по мере сближения магнита с ВТСП. Когда сила  $F$  становилась равной весу  $G$ , сверхпроводник поднимался с упора и начинал левитировать. Высота левитации  $h$ , определяемая как расстояние между центрами сверхпроводника и магнита, измерялась катетометром с погрешностью 0,01 мм. Начальная высота левитации  $h_0 \equiv h(t_0)$  измерялась спустя время  $t_0 = 5$  мин. Величина  $h_0$  для данной весовой нагрузки хорошо воспроизводилась в повторных опытах и рассматривалась как начальная высота при снятии релаксационных зависимостей.

**Серия опытов № 2.** Положение ВТСП фиксировалось, т.е. накладывалась абсолютно жесткая механическая связь. После охлаждения сверхпроводника кольцевой магнит перемещали вверх к ВТСП и устанавливали его на расстоянии  $h_0$ , которое было получено для данного веса  $G$  в *опыте № 1*. Поскольку условия намагничивания полностью повторялись, то магнитная сила, действующая на зафиксированный ВТСП образец, была равна весу  $G$ . В этой позиции система сверхпроводник/магнит выдерживалась в течение

определенного времени, затем механическая связь убиралась. После чего измеряли высоту левитации. Повторяя *опыт № 2* с разным временем фиксации образца, была получена релаксационная зависимость  $h(t)$ .

На рис. 16 представлены  $F(z)$  зависимости подъемной силы, действующей на объект левитации, от расстояния между сверхпроводником и постоянным магнитом, рассчитанные для разных путей намагничивания. Подъемная сила вычислялась как сила взаимодействия поля постоянного магнита с индуцированными этим полем сверхтоками:

$$F = \int_V J_\varphi B_r dV. \quad (5)$$



Рис. 16. Рассчитанные зависимости подъемной силы от расстояния между образцом и магнитом для разных путей намагничивания. Стрелки показывают, как изменяется сила при движении магнита из начального положения.

По мере приближения магнита к образцу сила  $F$  сначала возрастает до своего максимального значения, а затем величина  $F$  уменьшается. Левитация стабильна на восходящем участке, где  $(-dF/dz) > 0$ , т.е. в этой области при малых отклонениях левитирующего сверхпроводника от положения равновесия появляется возвращающая сила. На нисходящем участке, где  $(-dF/dz) < 0$ , левитация нестабильна. Только одна  $F(z)$  зависимость с начальной точкой  $z_0 = 10$  мм приведена целиком; остальные ( $z_0 = 2 - 9$  мм) показаны на участках, где левитация стабильна.

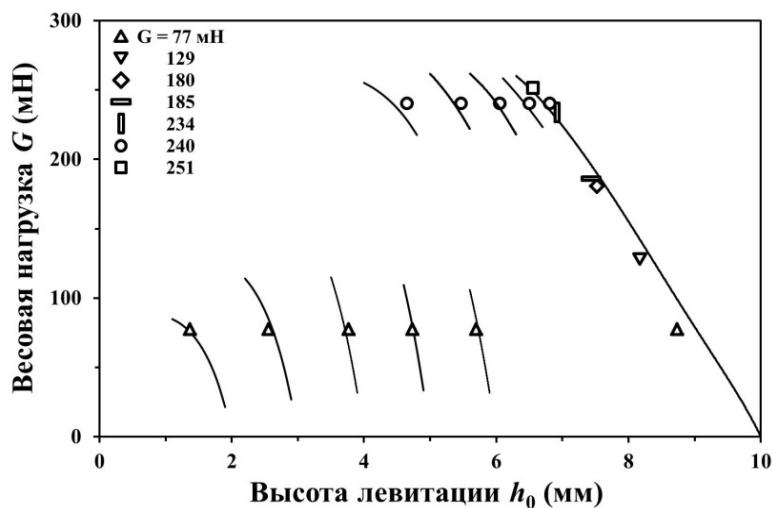
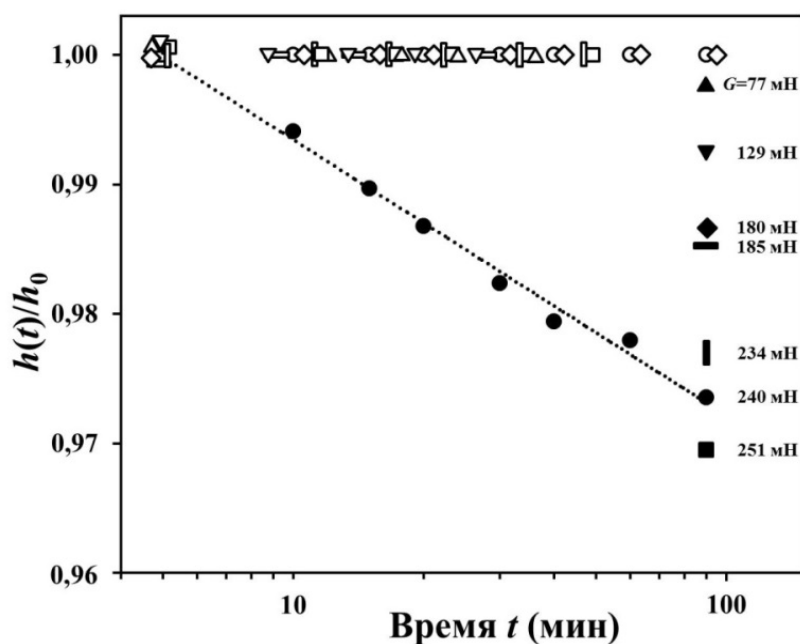


Рис. 17. Результаты измерений начальной высоты левитации для разных весов и разных путей намагничивания. Линии показывают соответствующие участки рассчитанных зависимостей  $F(z)$  (рис. 16).

На рис. 17 показаны результаты измерений начальной высоты левитации  $h_0$  для разных весовых нагрузок. Эксперименты были проведены для всех весовых нагрузок с путем намагничивания из положения  $z_0 = 10$  мм. Для весов  $G = 77$  мН и 240 мН были также выполнены опыты с другими начальными положениями  $z_0$ . Для сопоставления результатов эксперимента и численного расчета приведены соответствующие участки рассчитанных  $F(z)$  зависимостей.

Результаты измерений высоты левитации в зависимости от времени в опыте № 1 показаны светлыми символами на рис. 18. Зависимость высоты левитации от времени не была обнаружена – в отсутствие внешнего влияния на процесс левитации расстояние между ВТСП образцом и магнитом остается постоянным в течение длительного времени. Левитацию образцов с



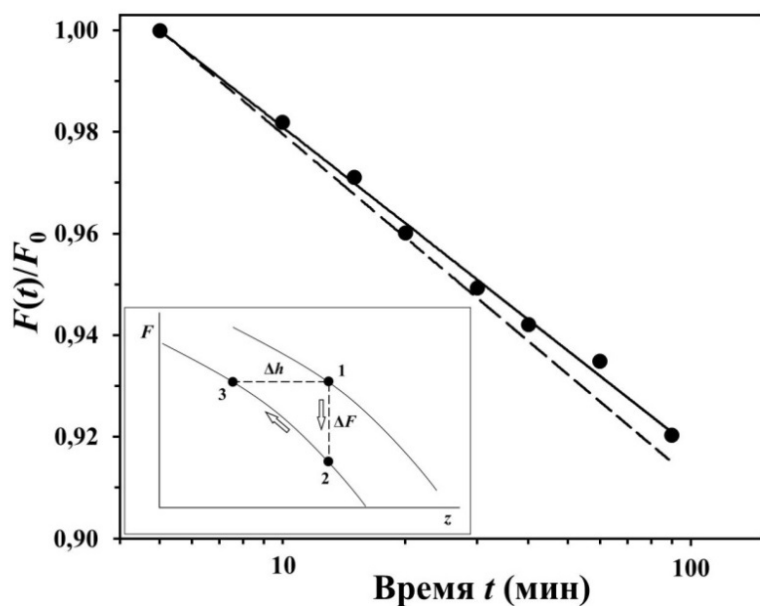
весом  $G = 180$  и 240 мН наблюдали в течение 8 часов, но никаких изменений начальной высоты не наблюдалось.

Рис. 18. Зависимости нормированной высоты левитации от времени в опытах № 1 без фиксации образца (светлые символы) и в опытах № 2 с фиксацией (темные символы).

Опыты № 2 с фиксацией ВТСП на высоте  $h_0$ , на которой образец левитировал в опыте № 1, показали, что после фиксации высота левитации становилась меньше, чем  $h_0$  (результаты показаны на рис. 18 темными символами). Большинство экспериментов было проведено при длительной фиксации ВТСП ( $t = 90$  мин). Можно видеть, что относительное изменение высоты левитации за это время зависит от весовой нагрузки  $G$ . Чем больше весовая нагрузка, тем больший объем сверхпроводника находится в критическом состоянии и, соответственно, больше будет скорость релаксации подъемной силы в фиксированном ВТСП, а, следовательно, больше будет изменение высоты левитации  $h$  после снятия фиксации.

На рис. 18 приведена также более детальная релаксационная зависимость для весовой нагрузки  $G = 240$  мН. (Экспериментальные точки для этой зависимости были получены повторением опыта № 2 при разных временах фиксации образца.) Зависимость линейная. Ее наклон определяет логарифмическую скорость релаксации, что является характерной особенностью процесса крипа магнитного потока.

На рис. 19 показана временная зависимость для подъемной силы (темные точки), которая была рассчитана из релаксационной зависимости для высоты левитации груза  $G = 240$  мН. Расчет был проведен следующим образом (см. вставку на рис. 19). При фиксировании ВТСП в точке левитации **1** (где  $F = G$ ), подъемная сила уменьшается со временем вследствие крипа потока (происходит так называемая *скрытая релаксация силы*), и система сверхпроводник/магнит переходит в состояние с  $F < G$  (точка **2**). В этой точке образец, освобожденный от внешней связи, начинает перемещаться ближе к магниту, пока не окажется в точке **3** с меньшей высотой левитации. Изменение высоты левитации  $\Delta h$  и магнитная жесткость системы  $dF/dz$  на участке **2-3**



(рис. 16) определяют изменение подъемной силы  $\Delta F$  за время фиксации ВТСП.

Рис. 19. Нормированная подъемная сила в зависимости от времени, рассчитанная из экспериментальных данных  $h(t)/h_0$  для  $G = 240$  мН. Пунктирная линия показывает данные, полученные в работе [11]. На вставке изображен переход при фиксации образца с уровня левитации **1** на уровень **3**.

На рис. 19 пунктирной линией показана релаксационная зависимость  $F(t)/F_0$ , которая была измерена раньше [11] для такого же ВТСП образца и при одинаковой начальной намагниченности. Наклон зависимостей практически совпадает. Это говорит о том, скорость скрытой релаксации силы в случае фиксирования левитирующего объекта такая же, как и скорость релаксации в опытах с непосредственным измерением силы в системе ВТСП/магнит. Однако эта релаксация *не имеет отношения к естественной левитации, при которой, как показали наши эксперименты, высота левитации не изменяется в течение длительного времени, а, следовательно, не изменяется и подъемная сила.*

Физическая природа этого явления (отсутствие релаксации силы левитации) не совсем ясна. Можно предположить, что эффект связан с собственными колебаниями объекта левитации, при которых сверхпроводник совершает малые перемещения относительно уровня подвеса. Такие колебания, создают на границе ВТСП очень слабое переменное магнитное поле, которое стабилизирует неравновесную конфигурацию вихрей в сверхпроводнике. При наложении механической связи на левитирующий объект собственные колебания подавляются, и это активизирует крип процесс.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

- 1) Экспериментально исследована локальная релаксация индукции на поверхности намагниченного сверхпроводника при сближении с ферромагнетиком, при наложении внешнего магнитного поля и в отсутствие внешнего воздействия на релаксацию.
- 2) Установлено, что неоднородное магнитное поле, направленное также как захваченное поле в сверхпроводнике, резко замедляет магнитную релаксацию. Эффект выражен тем сильнее, чем больше величина и неоднородность внешнего поля на поверхности сверхпроводника, в частности на тех участках, где находятся концы вихрей. Показано, что этот эффект подобен известному эффекту [1] подавления крипа потока при сближении намагниченного сверхпроводника с ферромагнетиком. Обнаружено, что при наложении неоднородного поля, направленного против захваченного поля, скорость магнитной релаксации возрастает, т.е. становится больше, чем скорость обычной релаксации в ВТСП в отсутствие факторов внешнего воздействия.
- 3) Впервые рассчитаны критические состояния в сверхпроводнике, возникающие в опытах с ферромагнетиком и с неоднородным магнитным полем, направленным согласно или против намагниченности сверхпроводника. Показано, что при сближении намагниченного сверхпроводника с ферромагнетиком, как и в случае воздействия внешнего неоднородного поля согласного направления, в сверхпроводнике устанавливается критическое состояние со встречной циркуляцией токов, при которой на отдельные участки нитей потока (в объеме и вблизи поверхности сверхпроводника) действуют встречные силы Лоренца. В результате крип потока должен замедляться.
- 4) Показано, что для объяснения всех полученных экспериментальных результатов помимо сил Лоренца необходимо учитывать магнитные силы, которые действуют на концы вихрей во внешнем неоднородном магнитном поле, и которые, в зависимости от направления этого поля, могут тормозить или ускорять магнитную релаксацию.
- 5) Разработана методика и собрана экспериментальная установка для изучения влияния магнитной релаксации на высоту подвеса и силу взаимодействия между ВТСП и магнитом в системе левитации.
- 6) Впервые экспериментально установлено, что релаксация подъемной силы в сверхпроводниковой системе левитации возникает только при ограничении подвижности объекта левитации, например, в опытах с непосредственным измерением этой силы. В случае реальной левитации, когда левитирующий объект опирается только на магнитное поле, высота левитации и, следовательно, подъемная сила не изменяется со временем.

## МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

*Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Smolyak, B.M. Retardation of the magnetic relaxation in high-temperature superconductors near a ferromagnet / B.M. Smolyak, G.V. Ermakov, M.S. Zakharov // J. Supercond. Nov. Magn. – 2011. – V. 24. – № 1-2. – P. 325-329.
2. Smolyak, B.M. Slowing-down of the vortex motion in the flux creep process by counter forces exerted on the vortex ends / B.M. Smolyak, M.S. Zakharov // Supercond. Sci. Technol. – 2012. – V. 25. – № 12. – P. 125019(1-5).
3. Zakharov, M.S. Effect of external nonuniform magnetic field on flux creep process in superconductor / M.S. Zakharov, B.M. Smolyak, G.V. Ermakov // J. Supercond. Nov. Magn. – 2013. – V. 26. – № 5. – P. 2013-2016.
4. Smolyak, B.M. On the force relaxation in the magnetic levitation system with a high- $T_c$  superconductor / B.M. Smolyak, M.S. Zakharov // Supercond. Sci. Technol. – 2014. – V. 27. – № 5. – P. 055018(1-5).
5. Zakharov, M.S. Slowing down of magnetic relaxation in superconducting levitation system / M.S. Zakharov, B.M. Smolyak // J. Supercond. Nov. Magn. – 2015. – V. 28. – № 2. – P. 619-623.

*Другие публикации:*

- 6 Smolyak, B.M. Applications of high- $T_c$  superconductivity / B.M. Smolyak, M.S. Zakharov, G.V. Ermakov, edited by A.M. Luiz. – Rijeka, Croatia: InTech, 2011. – P. 97-118.
7. Smolyak, B.M. Retardation of the magnetic relaxation in a superconductor near a ferromagnet / B.M. Smolyak, G.V. Ermakov, M.S. Zakharov // 2<sup>nd</sup> International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM-2010): abstract book (Antalya, Turkey, 25 – 30 April 2010). – P. 192.
8. Захаров, М.С. Эффект подавления крипа магнитного потока в сверхпроводнике, помещенном вблизи ферромагнетика / М.С. Захаров // XI Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества: тез. докл. (Верхняя Сысерть, Свердловской обл., 15 – 21 ноября 2010). – С. 48.
9. Zakharov, M.S. Suppression of flux creep by formation of opposed induction gradients in boundary region of superconductor / M.S. Zakharov, B.M. Smolyak, G.V. Ermakov // 3<sup>rd</sup> International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM-2012): abstract book (Istanbul, Turkey, 29 April – 4 May 2012). – P. 337.
10. Zakharov, M.S. Inhibition of magnetic relaxation in levitating high- $T_c$  superconductors / M.S. Zakharov, B.M. Smolyak // 4<sup>th</sup> International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM-2014): abstract book (Antalya, Turkey, 27 April – 2 May 2014). – P. 500.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Smolyak, B.M. Elimination of magnetic relaxation in superconductors on approaching a ferromagnet / B.M. Smolyak, G.V. Ermakov // *Physica C*. – 2010. – V. 470. – № 3. – P. 218-220.
- [2] Irreversible behavior of oriented grained  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ . Part 2: relaxation phenomena / C. Keller, H. Kupfer, R. Meier-Hirmer, U. Wiech, V. Selvamanickam, K. Salama // *Cryogenics*. – 1990. – V. 30. – № 5. – P. 410-416.
- [3] Hong, Z. Numerical solution of critical state in superconductivity by finite element software / Z. Hong, A.M. Campbell, T.A. Coombs // *Supercond. Sci. Technol.* – 2006. – V. 19. – № 12. – P. 1246-1252.
- [4] Bean, C.P. Magnetization of hard superconductors / C.P. Bean // *Phys. Rev. Lett.* – 1962. – V. 8. – № 6. – P. 250-253.
- [5] Yamasaki, H. Current-voltage characteristics and flux creep in melt-textured  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  / H. Yamasaki, Y. Mawatari // *Supercond. Sci. Technol.* – 2000. – V. 13. – № 2. – P. 202-208.
- [6] Brandt, E.H. Superconductor disks and cylinders in an axial magnetic field. I. Flux penetration and magnetization curves / E.H. Brandt // *Phys. Rev. B*. – 1998. – V. 58. – № 10. – P. 6506-6522.
- [7] Mechanics of individual isolated vortices in a cuprate superconductor / O.M. Auslaender, L. Luan, E.W.J. Straver, J.E. Hoffman, N.C. Koshnick, E. Zeldov, D.A. Bonn, R. Liang, W.N. Hardy, K.A. Moler // *Nature Phys.* – 2009. – V. 5. – № 1. – P. 35-39.
- [8] Yeshurun, Y. Magnetic relaxation in high-temperature superconductors / Y. Yeshurun, A.P. Malozemoff, A. Shaulov // *Rev. Mod. Phys.* – 1996. – V. 68. – № 3. – P. 911-949.
- [9] Краснюк, Н.Н. Левитация керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  в магнитном поле / Н.Н. Краснюк, В.П. Митрофанов // *Сверхпроводимость: физика, химия, техника*. – 1990. – Т. 3. – № 2. – С. 164-168.
- [10] Terentiev, A.N. Drift of levitated YBCO superconductor induced by both a variable magnetic field and a vibration / A.N. Terentiev, A.A. Kuznetsov // *Physica C*. – 1992. – V. 195. – № 1-2. – P. 41-46.
- [11] Смоляк, Б.М. Замедление магнитной релаксации в левитирующих сверхпроводниках / Б.М. Смоляк, Г.Н. Перельштейн, Г.В. Ермаков // *Письма в ЖТФ*. – 2006. – Т. 32. – № 3. – С. 8-13.