

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР  
им. Б.И.ВЕРКИНА

На правах рукописи

БАНДОС Татьяна Владимировна

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТОКОВЫЕ И  
КРИТИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВ И НОРМАЛЬНЫХ  
МЕТАЛЛОВ

Специальность 01.04.07 - физика твердого тела

Автореферат

на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук

Харьков - 1995



Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Физико-техническом институте низких температур  
им. Б.И. Веркина НАН Украины

## Научные руководители:

доктор физико-математических наук,  
**Нечипоренко** Иван Николаевич ;  
доктор физико-математических наук,  
**Звягин** Андрей Анатольевич

## Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
**Шкловский** Валерий Александрович ;  
доктор физико-математических наук,  
**Рожавский** Александр Семенович

Ведущая организация — Харьковский государственный университет

Защита состоится "5" мая 1995г. в \_\_\_\_\_ часов  
в \_\_\_\_\_ Специализированного ученого совета Д.02.35.02 при Физико-техни-  
ческом институте низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины по адресу:  
164, Харьков, просп. Ленина, 47.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИНТ НАН Украины.

Автореферат разослан "4" мая 1995г.

Отзывы на автореферат \_\_\_\_\_ копиях с подписью, заверенной гербо-  
вой печатью, просим направлять по адресу: 310164, г. Харьков — 164, просп. Ле-  
нина, 47. ФТИНТ НАН Украины, ученому секретарю Специализированного совета  
Д.02.35.02

Ученый секретарь  
Специализированного ученого совета  
доктор физико-математических наук

А.С. Ковалев

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Изучение существенно нелинейных неравновесных явлений является одним из основных направлений в современной физике твердого тела. Исследование нелинейных кинетических процессов образования и эволюции вихревых явлений в сверхпроводниках с током, представляет теоретический интерес с точки зрения изучения автоволновых структур различной физической природы [1-2] и актуально для создания условий надежной работы реальных криогенных систем [3,4]. Открытие нового класса объектов - металлооксидных сверхпроводников [5] - стимулировало интерес к исследованию влияния внешних тепловых и электромагнитных полей на устойчивость токовых состояний сверхпроводников до и после разрушения сверхпроводимости [6,7]. По современным представлениям в высокотемпературных сверхпроводниках существенную роль играет низкая размерность [8], что делает актуальными исследования свойств низкоразмерных точно решаемых моделей во внешних электромагнитных полях.

Изучение несилового топологического воздействия электромагнитного поля в точно решаемых системах [9,10] - модели Хаббарда с притяжением (аналог сверхпроводника второго рода), модели Кондо (описывающей немагнитный металл с магнитной примесью) - представляет интерес, поскольку в их поведении проявляются существенно квантовые свойства. Теоретические исследования, точно учитывающие нелинейность во взаимодействии квантовых возбуждений, стимулируют недавние экспериментальные работы по изучению осцилляций Ааронова-Кашера в 1D сверхпроводящем кольце и топологических эффектов в мезоскопических системах [11,12].

В настоящей диссертационной работе были поставлены основные цели:

- исследование кинетики перехода сверхпроводников с током в нормальное состояние под влиянием внешних тепловых и электромагнитных полей, устойчивости токовых состояний нормальных металлов;
- изучение несилового топологического воздействия электромагнитных полей на низкотемпературные электронные системы.

**Основные положения, выносимые на защиту**

1. Теоретически предсказано существование трех типов нелинейных релаксационных температурных волн в Y-Ba-Cu-O сверхпроводниках с током, исследованы структура и свойства этих волн, процесс релаксации вихревой новой фазы.

Изучено влияние температурной зависимости проводимости нормальной фазы и джоулевого разогрева границ сверхпроводящего образца на характеристики резистивного домена.

2. Исследовано воздействие нелинейности конвективного теплопереноса на устойчивость температурно-токового состояния нормальных металлов и определено, как она зависит от параметров системы. Предложена методика расчета критерия существования стационарного температурного поля в многослойных цилиндрических обмотках с током.

3. Найдено, что в одномерной модели Хаббарда с притяжением электронов на узлах (аналог сверхпроводника второго рода с малой длиной когерентности) отсутствует эффект четности для персистентных токов. Показано, что в одномерном "сверхпроводящем" кольце в смешанном состоянии возможны микроскопические осцилляции вярдовых и спиновых персистентных токов с дробными периодами, обусловленные разделением степеней свободы пар и несвязанных электронов.

4. Построена точная теория эффектов Ааронова – Бом и Ааронова – Кашера в металлическом кольце с магнитной примесью (проблема Кондо). Показано, что  $s-d$  взаимодействие электронов с примесью произвольного спина приводит к сдвигу фазы в периодической зависимости вярдового тока от магнитного потока и к уменьшению вдвое периода зависимости спинового тока от потока электрического поля. Предсказано существование микроскопических осцилляций энергии основного состояния по потоку внешнего магнитного поля с дробным периодом, обратно пропорциональным числу электронов в металлическом кольце с малой концентрацией магнитных примесей.

**Научная новизна работы** заключается в последовательном исследовании влияния температурной зависимости сопротивления нормальной фазы на релаксацию в нормальное состояние и свойства неоднородных температурных состояний длинномерных сверхпроводников с током, устойчивость низкотемпературных токовых состояний нормальных металлов. Изучение существенно нелинейных процессов в одномерных системах продолжено в сверхпроводящих и металлических мезоскопических кольцах во внешних электромагнитных полях.

**Научная ценность** диссертационной работы заключается в том, что точная разрешимость моделей низкоразмерных многочастичных электронных систем позволяет предсказать новые явления и получить существенную информацию о свойствах квантовых сильно взаимодействующих систем.

Полученные результаты развивают существующие представления о тепловых автоволновых процессах разрушения сверхпроводимости.

**Практическая ценность** результатов работы связана с использованием сверхпроводников в различных системах криогенной техники и с возможностью использования предсказанных свойств одномерных сильно коррелированных систем электронов в современной микроэлектронике.

Результаты работы **апробированы** на Всесоюзном совещании по высокотемпературной сверхпроводимости (Харьков, 1988), Советско-Западногерманском Симпозиуме по теплообмену (Харьков, 1989), Научной конференции "Высокотемпературные сверхпроводящие материалы" (Западная Германия, 1990), Международной конференции по технике низких температур (ЧСФР, Кошице, 1990) и **опубликованы** в девяти основных печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Конкретный вклад автора в разработку научных результатов, выносимых на защиту, состоит в решении задач, поставленных научными руководителями И.Н.Нечипоренко и А.А.Звягиным, и заключается в следующем:

- предсказано существование трех типов температурных волн типа кинка в высокотемпературных сверхпроводниках с током, исследованы их структура и свойства;
- получена и проанализирована зависимость длины теплового пятна от тока в сверхпроводящем мостике, температура на краях которого зависит от тока;
- исследовано влияние нелинейности конвективного теплопереноса на устойчивость токового состояния электрической обмотки из чистого металла;
- определена предельная плотность тока, ограничивающая область существования стационарного распределения температуры в многослойной цилиндрической обмотке, проанализировано влияние кризисов кипения охладителя и нелинейной температурной зависимости сопротивления;
- вычислены периоды мезоскопических осцилляций энергии основного состояния, обусловленные пересечением энергетических уровней цепочки Хаббарда с притяжением, при изменении потоков электрического и магнитного полей, определены дробные периоды микроскопических осцилляций токов в этой точно решаемой модели;
- вычислены амплитуда, период, фаза мезоскопических осцилляций зарядового и спинового токов, возникающих как следствие эффектов Ааронова-Бома

и Ааронова-Кашера в одномерном металлическом кольце с магнитной примесью (проблема Кондо); определены дробные периоды микроскопических осцилляций энергии основного состояния системы, обусловленных неселевым влиянием электромагнитного поля.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обсуждены объекты исследования, обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи данной работы, изложено краткое содержание основных разделов диссертации, перечислены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации диссертации и публикациях.

В первой главе изучается влияние тепловых полей на устойчивость токовых и критических состояний низкотемпературных сверхпроводников и нормальных металлов. Критическим состоянием сверхпроводника называется состояние, в котором плотность тока  $j$  однородно распределена по сечению и равна критической при данной температуре  $T$ ,  $j = j_c(T)$ . Плотность тока  $j_b$ , соответствующая абсолютной неустойчивости сверхпроводящей фазы, может быть и меньше  $j_c(T)$ . В настоящей главе определяется  $j_b$  - граница устойчивости стационарного нормального состояния композитных сверхпроводников после разрушения сверхпроводимости в условиях неавтономности и (или) нелинейности теплоотода.

В первом разделе первой главы обсуждается переход из однородного метастабильного температурно-электрического состояния в однородное стабильное, которое может реализоваться посредством образования неоднородного промежуточного состояния с устойчивой температурой и напряженностью электрического поля - температурно-электрических доменов (далее - ТЭД). ТЭД аналогичен критическому зародышу при фазовых переходах I рода.

Во втором разделе первой главы предложена методика расчета критерия устойчивости резистивного токового состояния цилиндрической обмотки сверхпроводящей магнитной системы (СМС)<sup>1</sup>. Используется феноменологический подход, основанный на исследовании решений одномерного уравнения теплопроводности с учетом зависимости проводимости металла от его температуры и нелинейности теплоотода.

Стационарное распределение температуры многослойной обмотки определено из замкнутой системы уравнений энергетического баланса в дискретной и континуальной формах.

<sup>1</sup>Обмотка СМС обычно изготавливается из композитных сверхпроводников, состоящих из металлической матрицы (с высокими значениями проводимости и теплопроводности) с включенными в нее нитями из сверхпроводников II рода.

нуальной моделях (в линейном приближении для зависимости удельного сопротивления металла  $\rho$  от температуры  $T$ ). Показано, что наименьшее собственное значение положительно определенного разностного (дифференциального) оператора дискретной (континуальной) модели, заданного на классе функций, удовлетворяющих однородным граничным условиям, определяет значение плотности тока, граничное для существования стационарного распределения температуры.

Определена зависимость границы абсолютной неустойчивости стационарного температурного поля многослойной обмотки от параметров системы — эффективного коэффициента теплопроводности, толщин проводящих и изолирующих слоев и их числа. Численно показано, что континуальная модель обеспечивает приемлемую точность в определении граничной плотности тока и применима в случае цилиндрической обмотки.

Получены явные формулы для граничного значения плотности тока, при котором происходит самопроизвольный переход цилиндрической многослойной обмотки, охлаждаемой внутри или снаружи, из исчезающего состояния с низкой средней температурой в состояние с высокой средней температурой. Методика расчета граничных токов в многослойных цилиндрических электрических обмотках подтверждена сравнением с экспериментом на цилиндрических медных обмотках, погруженных в жидкий азот.

В результате анализа совместного влияния нелинейного теплоотвода и нелинейной температурной зависимости проводимости чистого алюминия на тепловую устойчивость токового состояния электрической обмотки показано, что лавинообразное повышение ее средней температуры происходит после исчезновения абсолютно неустойчивого состояния, соответствующего пленочному кипению гелия, азота и кризису пузырькового кипения водорода.

Третья часть первой главы посвящена изучению гидродинамического аспекта проблемы устойчивости токовых состояний чистых металлических проводников, охлаждаемых газом. В одномерной постановке полностью решена задача о свободной конвекции газа по замкнутому контуру в поле центробежных сил под действием продольного градиента температур (между нагреваемым на-за джоулевых потерь участком и охлаждаемым).

Получены выражения для стационарного распределения температуры и плотности газа. В области изменения термодинамических величин, где уравнение состояния можно линеаризовать, определен расход газа (количество газа, проходящего в единицу времени через поперечное сечение канала). На основе анализа решения

определено граничное значение плотности тока

$$j_b^{conv} = j_b \left[ 1 + \frac{\alpha_3 p_3}{\alpha_1 p_1} \right]^{-1/2},$$

$$j_b = [\alpha_3 p_3 / A \rho']^{1/2}, \quad (1)$$

при котором стационарное распределение температуры теряет устойчивость и происходит лавинообразное разогревание всей системы. В этой формуле используются следующие обозначения:  $A$  – площадь сечения обмотки в плоскости, перпендикулярной оси канала,  $P$  – периметры канала; индексы 1 и 3 относятся соответственно к охлаждаемому и нагреваемому каналам,  $\rho'$  – производная по температуре от удельного сопротивления обмотки в точке, соответствующей постоянной температуре стенок охлаждаемой части контура.

Было показано, что по мере приближения к границе абсолютной неустойчивости стационарного состояния системы ( $j \rightarrow j_b^{conv}$ ) циркуляция газа затухает, течение газа становится ламинарным; а в этом режиме течения коэффициенты теплоотдачи перестают зависеть от расхода. Тем самым доказано, что (1) непосредственно определяет границу тепловой неустойчивости системы, характеризуемую  $j_b^{conv}$ , хотя в общем случае коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1, \alpha_3$  зависят от расхода газа, который, в свою очередь, связан с током, и выражение (1) представляет собой уравнение относительно  $j_b^{conv}$ . Сделанный вывод о том, что предельно допустимое значение тока в обмотке, охлаждаемой газом посредством конвективного теплопереноса –  $j_b^{conv}$  ниже, чем в случае вынужденного течения охлаждаемого газа  $j_b$  (при одинаковых расходах), может иметь практическое значение для организации системы охлаждения вращающихся устройств.

Во второй главе диссертации исследованы нелинейные кинетические процессы образования и эволюции зародышей нормальной фазы (НФ) в сверхпроводниках. Подробно изучены условия появления и характеристики трех устойчивых однородных температурно-токовых состояний ВТСП и нелинейных релаксационных волн типа кинка, соответствующих переходам между ними.

Нелинейная температурная волна описывается солитонным решением типа кинка одномерного нестационарного уравнения теплопроводности (применимого если глубина проникновения теплового поля больше толщины сверхпроводника)

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial X} \right] + G(T, j) - H(T), \quad (2)$$

где  $C(T)$  – удельная теплоемкость,  $G(T, j)$  – мощность тепловой диссипации в единице объема образца,  $H(T)$  – тепловой поток в термостат с поверхности проводника единичной эффективной толщины,  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности.

Это решение удовлетворяет граничным условиям, которые определяются решением уравнения теплового баланса (т.е. стационарного однородного уравнения теплопроводности)

$$G(T_i, j) = H(T_i), \quad i = 0, 1, 2. \quad (3)$$

Общий вид многозначного решения (3) графически представлен на рис.1.

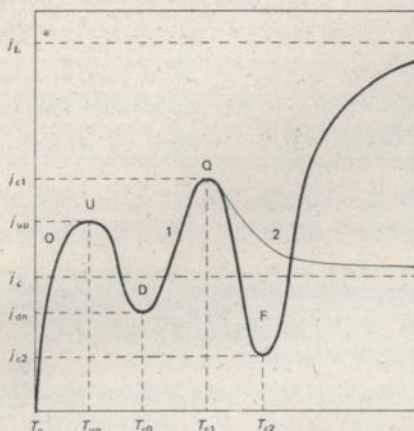


Рис. 1

Зависимость стационарной однородной температуры ВТСП образца от плотности тока

Ветви кривой  $T(j)$ , обозначенные на рис. 1 цифрами 0, 1, 2, относятся к различным устойчивым температурам ВТСП при пузырьковом ( $T_0$ ,  $T_1$ ) и пленочном ( $T_2$ ) кипении охладителя с температурой  $T_N$ ; а ветви с отрицательным наклоном — неустойчивы. Условие существования трех однородных температурных состояний ВТСП с током, охлаждаемым жидким азотом, имеет вид  $T_{c0} < T_{c1}$ ,  $T_{c0}$  — температура сверхпроводящего перехода,  $T_{c1}$  — температура первого кризиса пузырькового кипения.

В первом разделе второй главы рассмотрены специфические особенности вольт-амперных характеристик (ВАХ) в ВТСП системах, проведена их классификация. Обсуждается связь гистерезисов на ВАХ с мультистабильностью металлооксидных образцов.

В втором разделе второй главы изучаются структура и свойства релаксационной  $N-S$  волны I типа в ВТСП образцах с током.

Автоволна первого типа связана с переключениями между резистивным (или сверхпроводящим) состоянием с  $T = T_0 < T_{c0}$  ВТСП образца и "холодным" нормальным состоянием с  $T = T_1 < T_{c1}$  (рис.1).

В рамках подхода, основанного на точном решении уравнения теплопроводности при скачкообразной аппроксимации функции тепловых потерь в образце сверхпроводящем при  $j < j_c(T_N)$ , была получена зависимость скорости волны первого типа от тока с учетом линейной температурной зависимости нормального сопротивления керамики (или сопротивления стабилизирующей матрицы нормального металла). По сравнению с предыдущими исследованиями  $N-S$  волны в ВТСП, стабилизированных медной матрицей [6], в настоящем разделе задача рассматривается самосогласованным образом: учитывается зависимость температуры скачка тепловыделений от плотности тока  $T_s = T_s(j)$ , связанная с нелинейной зависимостью от температуры нормального сопротивления  $\rho(T, j)$  (то есть с нелинейностью ВАХ).

Область существования автоволны I типа ограничена по плотности тока значениями  $j_{up}$ ,  $j_{dn}$ , при которых на ВАХ образца в режиме постоянного тока должны наблюдаться скачки напряжения.

Показано, что теоретические значения  $j_{up}$ ,  $j_{dn}$ , полученные с использованием модельной аппроксимации  $\rho(T, j)$  удовлетворительно согласуются с экспериментом.

В третьем разделе второй главы изучается волна переключения II типа из "холодного" нормального состояния ВТСП образца с температурой  $T_1$  в "горячее" нормальное состояние с  $T = T_2$  (рис. 1).

В случае

$$j_{c1} < j_b$$

получено формальное выражение для зависимости тока от скорости волны II типа; здесь  $j_{c1}$ ,  $j_{c2}$  определяются решениями уравнения (3) относительно плотности тока при постоянных значениях температуры кризиса кипения охладителя  $T_{c1}$ ,  $T_{c2}$ , ( $j_{c1}$  - пузырькового,  $j_{c2}$  - пленочного) (рис.1). Значение плотности тока, соответствующее исчезновению стационарного решения  $T = T_2$  при  $z \rightarrow \pm\infty$ , определяется формулой, аналогичной (1):  $j_b = [\alpha_f / (a\rho')]^{1/2}$ , в которой  $a$  - эффективная толщина ВТСП образца,  $\alpha_f$  - коэффициент теплообмена с охладителем в режиме пленочного кипения,  $\rho'$  - производная по температуре от сопротивления сверхпроводника в нормальном состоянии (или его матрицы).

В предельных случаях – на границах области существования волны II типа по току – получено явное асимптотическое выражение для скорости этой волны и универсальная асимптотика для длины участка смешанного режима кипения на ее стационарном профиле. Показано, что длина области переходного режима кипения достигает минимального значения при равновесии "холодной" и "горячей" нормальных фаз, когда температурной зависимостью сопротивления сверхпроводника в нормальном состоянии можно пренебречь.

В случае

$$j_{c1} > j_b,$$

показано, что скорость волны второго типа с растущим температурным уровнем  $T_2 \rightarrow \infty$  при  $x \rightarrow \infty$  остается конечной при  $j \rightarrow j_b$  (рис. 1). Она ограничена значением предельной скорости распространения "горячей" нормальной фазы при  $j = j_{c1}$ .

Показано, что существование теплового равновесия высокотемпературного сверхпроводника (в нормальном состоянии) с азотом до первого кризиса кипения предохраняет проводник от перегрева при пленочном режиме охлаждения.

Получена система уравнений, определяющая скорость движения границы раздела сверхпроводящей ( $T = T_0$ ) и "горячей" нормальной  $T = T_2 > T_{c1}$  фаз, т.е. скорость волны третьего типа.

В четвертой части второй главы подробно изучена зависимость от тока длины нормального домена в тонком высокотемпературном сверхпроводящем (Zr-Y-Ba-Cu-O системы 1-2-3) "мостике", ограниченном "берегами" контактов с температурой, зависящей от тока из-за джоулевого саморазогрева. Решено одномерное стационарное уравнение теплопроводности в однородном сверхпроводящем образце, с учетом линейной температурной зависимости сопротивления нормального состояния. В результате получено неоднородное распределение температуры  $T(x, j)$ , описывающее нормальный ТЭД в сверхпроводнике. Показано, что повышение нормального сопротивления керамики с температурой приводит к уменьшению минимального тока появления нормальной фазы и является причиной неограниченного увеличения температуры образца при значении тока, которое совпадает со значением тока распространения нормальной волны по всей длине образца, если температура на его границах равна температуре термостата.

Третья глава диссертации посвящена изучению осцилляций энергии основного состояния цепочки Хаббарда с притяжением электронов на уолах (аналог сверхпроводника II рода с малой длиной когерентности) под несильным топологическим воздействием электромагнитного поля.

В первом разделе третьей главы описывается связь ВТСП и модели Хаббарда с притяжением на узлах. Модель Хаббарда — модель решеточного газа с локальным взаимодействием электронов — может описывать свойства металлооксидных сверхпроводников [8]. Эта система интересна прежде всего тем, что допуская точное решение она моделирует поведение "низкоразмерного сверхпроводника". Вместе с тем параметр порядка в модели Хаббарда с притяжением равен нулю даже при нулевой температуре. Именно поэтому под действием калибровочных электромагнитных полей имеют место осцилляции зарядового тока и связанного с ним диамагнитного момента, а не квантование потоков внешних полей. Изучение отличия низкоразмерных систем на несиловое влияние электромагнитного поля (эффекты Ааронова-Бома и Ааронова-Кашера) в рамках точно решаемых моделей — модели Хаббарда, модели Кондо — позволяют проследить за проявлением их квантовых свойств.

Во втором разделе третьей главы приведены основные уравнения аноаца Бете, описывающие поведение модели Хаббарда при несиловом воздействии внешнего электромагнитного поля, возникновение которого связано с эффектами Ааронова-Бома и Ааронова-Кашера.

В третьем разделе третьей главы показано, что в цепочке Хаббарда с сильным притяжением  $N$  электронов на узлах или при малых числах заполнения под несиловым воздействием магнитного и электрического полей появляются микроскопические осцилляции энергии основного состояния. Периоды этих осцилляций дробные:  $\Phi_0/N$  и  $F_0/(N - 2M)$ , ( $M$  — число пар). Эти микроскопические осцилляции персистентных токов связаны с разделением степеней свободы локальных пар и несвязанных электронов и реализуются в полях, превышающих критическое поле разрыва пар.

В четвертом разделе третьей главы исследована роль кроссовера энергетических уровней в изменении периода мезоскопических осцилляций персистентных токов. Показано, что эффект четности, проявляющийся в зависимости периода осцилляций персистентных токов от общего числа электронов и числа электронов с перевернутым спином, в цепочке Хаббарда с притяжением на узлах (в потоке электромагнитного поля) отсутствует.

В четвертой главе рассмотрено поведение одномерного немагнитного металлического кольца с магнитной примесью (Кондо), помещенного в поток калибровочного электромагнитного поля.

Известно, что магнитное взаимодействие электронов с примесью приводит к изменению эффективного спина примеси за счет спиновой поляризации электрон-

ного облака, а зарядовые степени свободы остаются теми же, что и для системы свободных электронов.

В этой главе показано, каким образом примесь проявляет себя во взаимодействии спиновых степеней свободы электронов при неслабом (топологическом) воздействии электромагнитного поля.

В первом разделе четвертой главы найдены поправки к энергии основного состояния металлического кольца с примесью Кондо и показано, что они пропорциональны квадратам дробных частей потоков электрического (эффект Ааронова – Кашера) и магнитного (эффект Ааронова – Бома) полей и скоростям Ферми зарядовых и спиновых возбуждений. Особенностью квантовых топологических эффектов в этой системе является практическая независимость зарядовых и спиновых возбуждений, что проявляется в отсутствии слагаемых, пропорциональных смешанному зарядово-спиновому “одетым” парам возбуждений.

Показано, что в металлическом кольце, помещенном в поток электромагнитного поля, наличие даже одной магнитной примеси приводит к эффективному взаимодействию между “объемными” электронами, которое проявляется в мезоскопических поправках конечного размера к энергии основного состояния. т.е. в эффектах Ааронова–Бома и Ааронова–Кашера. В первом эффекте взаимодействие сдвигает начальную фазу персистентного тока. Во втором случае – взаимодействие приводит к осцилляциям энергии основного состояния как с обычным металлическим периодом  $F_0$ , так и с периодом  $F_0/2$ , связанным с движением топологических спиновых возбуждений под действием потока электрического поля. Взаимодействие перенормирует также величину фермиевской скорости спиновых возбуждений.

Во втором разделе четвертой главы показано, что в металлическом кольце с малой концентрацией примесей имеют место микроскопические осцилляции персистентных токов с дробным периодом  $\Phi_0/N$ , которые проявляются при любых константах  $s-d$ -взаимодействия электронов с примесью. Характер взаимодействия с примесями обеспечивает полное разделение спиновых и зарядовых возбуждений в системе, что приводит к независимости микроскопических осцилляций от обменной константы.

Микроскопические колебания генерируются виртуальным рождением спинов в системе (или изменением быстрот спинов) и связаны с движением объемных электронов как целого в отличие от мезоскопических осцилляций (с периодом  $\Phi_0$ ), связанных с движением одного электрона (возбуждения). Эти колебания являются проявлением эффективного взаимодействия между электронами в системе, вызванного их взаимодействием с примесями, даже при очень малой концентрации после-

дних.

**В Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Zhitomirsky I.S., Bandos T.V., Nechiporenko I.N., Critical currents in hyperconducting windings // *Cryogenics*. - 1985. - V.25, N.3. - P.387-392.
2. Bandos T. V., Non-linear thermal relaxation waves // *Cryogenics*. - 1991. - V.31, N.11. - P.962-968.
3. Звягин А.А., Бандос Т.В. Микроскопические осцилляции персистентных токов в металлическом кольце с магнитной примесью (Кондо) // *Письма в ЖЭТФ*. - 1995. - Т.61, вып.8. - С.662-665.
4. Звягин А.А., Бандос Т.В., Квантовые топологические эффекты в металлах с Кондо примесью // *ФНТ*. - 1994. - Т.20, вып.3. - С.280-282.
5. Бандос Т.В., Критические токи в электрических обмотках, охлаждаемых термосифонным способом // *Изв.АН СССР, серия Энергетика и транспорт*. - 1986 - Т.5. - С.68-76.
6. Бандос Т.В., Батрак А.Г., Банько В.Ю., Нечипоренко И.Н., Тихенко Э.В., Stability of the high-temperature superconductors cooled by liquid Nitrogen, // *ФНТ*. - 1990 - Т. 16. - С. 484 - 486.
7. Бандос Т.В., Батрак А.Г., Банько В.Ю., Нечипоренко И.Н., Тихенко Э.В., Стабилизация сверхпроводящего состояния длинномерных токонесущих ВТСП элементов. // *ВТСП. МНТС. Москва.*-1990.-Т.1 - С.19-24.
8. Бандос Т.В., Житомирский И.С., Левченко Н.М., Нечипоренко И.Н. и др., Исследование критических токов в гиперпроводящей обмотке, охлаждаемой жидким азотом. // *В сб.: Криогенное машиностроение*. - Киев: Наукова Думка, 1987. - С. 61-66.
9. Bandos T.V., Batrak A.G., Nechiporenko I.N., Tikhenko E.V., Current carrying capacity of Zr-Y-Ba-Cu-O conductors produced by oriented crystallization. // *Cryogenic Engineering Conference, International Cryogenic Materials Conference. Abstracts*. - Kiev. - 1992. - P. 75.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич А.В., Мияц Р.Г., Тепловые автоволны в нормальных металлах и сверхпроводниках. - М.: ИВТАН - 1987. - 167С.
2. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М., Математическая теория горения и взрыва. - М.: Наука 1980.  
Хенри Д. Геометрическая теория полудлинейных параболических уравнений. - М.: Мир. 1985. - 376 с.
3. Альтов В. А., Зенкевич В. Б., Кремлев М. Г., Сычев В.В. Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем. - М.: Энергия. - 1975. -326С.
4. Nechiporenko I.N., Normal zone propagation within a superconducting system and cryostabilization of superconductivity // Cryogenics.- 1983.-V.23, N.3.-P.387-392.
5. Bednorz J.G., Muller K.A., Possible high - T superconductivity in the Ba - La - Cu - O system // Z. Phys. B. - 1986. - V.64, N 2. - P.189 -193.
6. Львовский Ю.М., Распространение нормальной фазы с растущим температурным уровнем в высокотемпературных сверхпроводниках // Письма в ЖТФ - 1989. - Т. 15, вып. 15 - С.148-151.
7. Skokov V.N. and Koverda V.P., Thermal multistability of YBCO films // Cryogenics - 1993. - V.33, N 11. - P.1072 -1077.
8. Anderson P.W., The resonating valence band state in La Cu O and superconductivity // Science. - 1987. - V.236 - P. 4793.
9. Изюмов Ю.А., Скрыбки Ю.Н., Статистическая механика магнитоупорядоченных систем. - М.:Наука, 1987 - 264 С.
10. Звягин А.А., Несиловое топологическое влияние электромагнитного поля на цепочку Хаббарда с притяжением // ЖЭТФ - 1993. -Т.103, В.1. - С.307 -315.
11. Elion W.J., Wachters J.J., Sohn L.L. and Mooij E.J., Observation of the Aharonov - Casher effect for vortices in Josephson - junction arrays // Phys. Rev. Lett. - 1993. - V.71, N14 - P. 2311 - 2315.
12. Mailly D., Chapelier C. and Benoit A., Experimental observation of persistent currents in a Ga As - Al Ga As single loop// Phys.Rev.Lett. -1993. V.70, N 13. - P. 2020 - 2024.

**Bandos T.V.** The influence of the low-frequency magnetic field on the critical states of superconductors and normal metals

The thesis for obtaining the Candidate's degree (Candidate of Sciences in Physics and Mathematics), speciality 01.04.07. – physics of solid state, B. I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, Kharkov, Ukraine, 1995.

Defended are the 9 scientific works containing the results of theoretical investigations of the kinetics of the transition of the current carrying superconductors into the normal state, stability of the current states of the normal metals as well as the nonlinear response of the low – dimensional systems to the nonpower influence of the electromagnetic field.

Three types of the nonlinear thermal autowaves are supposed to occur in the high- $T_c$  superconductors Y-Ba-Cu-O and their structure and properties are investigated. Within the scope of one – dimensional exactly solvable models, i.e., the Hubbard model with attraction and in Kondo model, persistent currents in microscopic and mesoscopic rings threaded with magnetic and electric fluxes have been studied as functions of the fluxes.

**Бандос Т.В.** Вплив теплових та електромагнітних полів на струмові та критичні стани надпровідників та нормальних металів.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата фізико – математичних наук за фахом 01.04.07. – фізика твердого тіла. Фізико – технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, Харків, 1995.

Захищаються 9 наукових праць, що містять результати досліджень кінетики переходу надпровідників зі струмом до нормального стану, стійкості струмових станів нормальних металів та вивчення нелінійного відгуку низьковимірних систем на несилловий вплив електромагнітного поля. Передбачені три типи нелінійних температурних автохвиль в Y-Ba-Cu-O високотемпературних надпровідниках, досліджені їх структура та властивості. В рамках одновимірних точнорозв'язувальних систем: моделі Хаббарда з притягненням та моделі Кондо – досліджені осциляції персистентних струмів в мезоскопічних та мікроскопічних кільцях в потоках електричного та магнітного полів.

**Ключові слова:** надпровідник, температурна автохвиля, теплова стійкість, персистентні струми, анзац Бете, ефект парності, ефект Ааронова – Бома, ефект Ааронова – Кашера.

Ответственный за выпуск – кандидат физико-математических наук  
КИРЮШИН А. А.

Подписано к печати 11.10.1995г.,

физ. п. л. 1, учет. изд. л. 1, заказ N 40, тираж 100 экз.

Ротапринт ФТИНТ НАН Украины, 310164, Харьков- 164, пр. Ленина, 47