

На правах рукописи

Круглов Сергей Леонидович

**Стабильность низкотемпературных сверхпроводниковых магнитов
и разработка методов ее повышения**

Специальность: 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

**Автореферат
диссертации на соискание
ученой степени доктора
технических наук**

Автор:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Круглов', is placed over a light blue rectangular background.

Москва 2013

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре
«Курчатовский институт»

Научный консультант: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Кейлин Виктор Ефимович,
главный научный сотрудник
Курчатовского НБИКС-Центра

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Ковалев Лев Кузьмич,
заведующий кафедрой МАИ
(национального исследовательского
университета)

доктор технических наук
Копылов Сергей Игоревич,
заведующий отделом НТЦ ФСК ЕЭС

доктор физико-математических наук,
профессор,
Фишер Леонид Михайлович,
начальник отделения ВЭИ им. В.И. Ленина

Ведущая организация: ОАО ВНИИНМ им. А.А. Бочвара

Защита состоится «27» ноября 2013 г. в 15 часов 00 минут
на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 НИЯУ МИФИ
по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ

Автореферат разослан «___» октября 2013 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре,
заверенном печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



Чернов И.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Все более широкое использование низкотемпературных сверхпроводниковых магнитов (СМ) в науке, технике и медицине сопровождается тенденцией к постоянному росту их размеров и эксплуатационных характеристик – конструктивной плотности тока и индукции магнитного поля в рабочем объеме. Высокие ponderomotive механические напряжения проводника (> 100 МПа) приводят к механотермическим неустойчивостям в обмотках. Эти неустойчивости представляют собой локальные скачкообразные пластические деформации, при которых часть упругой энергии в деформированном проводнике и окружающем его изолирующем и связующем витки материале выделяется в виде тепла, иногда достаточного для зарождения и распространения по обмотке СМ нормальной зоны. Обмотка после таких переходов в нормальное состояние упрочняется, повышая предел упругости, и следующий акт такой деформации происходит при большем токе, что является причиной так называемой тренировки СМ. Одна из основных задач разработчиков СМ – избавиться от дорогостоящего процесса тренировки.

В переменных режимах работы могут возникать термомагнитные возмущения в виде скачков магнитного потока, обусловленных неустойчивостью профиля магнитного поля в сечении сверхпроводника. При этом происходит переход от крайне неоднородного распределения тока по сечению к однородному с выделением с тепла, достаточного для нагрева до критической температуры. Переход от адиабатических условий в плотных обмотках СМ к непосредственному охлаждению проводника значительно повышает их стабильность (устойчивость сверхпроводящего состояния проводника к тепловым и электромагнитным возмущениям). При этом важно знать, насколько это повышение зависит от фазового состояния хладагента, включая насыщенный и недогретый (при давлении 0,1 МПа) сверхтекучий гелий. Для СМ непосредственное охлаждение проводника означает введение в обмотку каналов для хладагента, что приводит к снижению конструктивной плотности тока, механической и электрической прочности. Альтернативой может стать усовершенствованный метод энтальпийной стабилизации, при котором либо в проводник, либо в межвитковый компаунд, либо в изоляцию вносят несколько объемных процентов высокотеплоемких добавок (ВД) – соединений из редкоземельных металлов (например, HoCu_2 , PrB_6 , $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$, Gd_2O_3 и др.), теплоемкость которых в интервале температур (4–10) К на 2–3 порядка превосходит теплоемкость конструкционных материалов СМ. Необходимо количественно сравнить эти два метода повышения стабильности СМ.

Особый вид сверхпроводящего токонесущего элемента – комбинированный сверхпроводник типа «кабель-в-оболочке» (КВО). Иногда нужно различить по уровню стабильности одинаковые по составу, но различные по внутренней структуре образцы КВО для выбора под конкретный СМ, в частности, для обмоток токамака. Поэтому существует потребность в разработке простой экспериментальной методики, позволяющей выделить такие различия. Важной задачей, связанной с КВО, является разработка оптимальной конструкции низкоомного (< 10 нОм) стабильного узла соединения отдельных кусков КВО для токамаков, способного работать в переменном режиме.

При создании новых токамаков из сильноточных КВО необходимо проведение их предварительных испытаний на критические токи, устойчивость к электромагнитным нагрузкам и к импульсным магнитным полям, имитирующим срывы тока плазмы. Возникает потребность в источнике питания в виде стабильного быстродействующего сверхпроводникового трансформатора постоянного тока ($I > 50$ кА, $dI/dt > 75$ кА/с).

Цель работы.

Повышение надежности работы сверхпроводящих магнитов для высокотехнологичных областей современной науки и техники.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- проведены комплексные исследования влияния различных электрофизических и теплофизических факторов на стабильность сверхпроводников разных конструкций на основе сплава Nb-Ti и интерметаллида Nb₃Sn, а также модельных СМ из этих проводников;
- сопоставлено влияние на стабильность различных фазовых состояний хладагента (от газообразного He и He-I при 4,2 К до He-II при 1,9 К) при непосредственном охлаждении проводника СМ гелием;
- проведено принципиальное сравнение двух способов повышения стабильности СМ: введение охлаждения гелием через каналы в обмотке и использования усовершенствованного метода энтальпийной стабилизации плотных обмоток при помощи внесения в их состав небольших количеств ВД;
- на основе полученных экспериментальных и расчетных данных обеспечен необходимый уровень стабильности работы в переменных режимах сверхпроводящих устройств на основе сплава Nb-Ti: низкоомного (4 нОм) узла соединения отдельных кусков сильноточного КВО (45 кА) для токамаков и быстродействующего сверхпроводящего трансформатора постоянного тока с $I = 50$ кА и $dI/dt = 75$ кА/с.

Научная новизна работы.

1. Впервые на специально разработанной конструкции СМ, фактически являющимся массивным сверхпроводником – геликоиде с плоскими витками из множества расположенных в ряд гальванически и механически связанных одиночных композитных Nb-Ti проводников обнаружены неизвестные ранее физические эффекты:

– аномально сильная зависимость криостатической стабильности (устойчивости к тепловым возмущениям) от динамики магнитного потока – перераспределения тока и поля в поперечном сечении проводника в процессе ввода тока/поля и после его остановки;

– уникальное явление обратной динамики магнитного потока (восстановление первоначального распределения тока и поля по сечению) после ограниченного скачка магнитного потока на тепловой неоднородности ($\sim 4\%$ по объему) в геликоиде, охлаждаемом сверхтекучим гелием при $T = 2,13$ К;

– влияние на криостатическую стабильность «географии» (места приложения) и «геометрии» (пространственного размера) возмущений.

2. Впервые без обычного подгоночного параметра – коэффициента теплоотдачи, экспериментально проверена теория терромагнитной стабильности (устойчивости к скачкам магнитного потока) на охлаждаемых Nb-Ti и Nb₃Sn геликоидах, в том числе, и в сверхтекучем гелии.

3. Впервые с использованием двух принципиально различных экспериментальных методик обнаружено и объяснено практическое отсутствие влияния охлаждения He-II по сравнению с He-I на криостатическую стабильность в наиболее востребованной для практики области транспортных токов, близкой к критическому ($i = I/I_c = 0,7 \div 0,9$).

4. Впервые в комбинированных сверхпроводниках типа КВО обнаружены скачки магнитного потока во внешнем возрастающем магнитном поле при нулевом транспортном токе.

5. Впервые предложена конструкция и способ изготовления низкоомного (4 нОм) узла соединения (спая) отдельных кусков сильноточного на 45 кА комбинированного сверхпроводника типа КВО из сплава Nb-Ti, основанные на постепенном снижении температуры плавления припоя на каждой стадии изготовления.

6. Впервые разработан, изготовлен и успешно испытан стабильный быстродействующий сверхпроводящий трансформатор постоянного тока на 50 кА со скоростью ввода в нагрузку 75 кА/с.

7. Впервые на основе комплексных экспериментальных и расчетных исследований повышения стабильности низкотемпературных СМ с помощью различных методов легирования их высокотеплоемкими добавками на разных типах модельных СМ и сверхпроводников на основе сплава Nb-Ti и интерметаллида Nb₃Sn (одно- и многожильных, резерфордовских кабелей) показано, что по эффективности повышения стабильности эти методы сравнимы с непосредственным охлаждением жидким гелием.

Таким образом, в диссертации в результате комплексного экспериментального и расчетного исследований решена крупная научная проблема значительного повышения надежности работы низкотемпературных сверхпроводниковых магнитов за счет повышения стабильности с помощью различных методов внесения в них высокотеплоемких добавок и создания нового класса низкотемпературных композитных сверхпроводников – теплостабилизированных.

Научная и практическая ценность работы.

Проведенные исследования развивают существующие представления макроскопической электродинамики о разрушении сверхпроводящего состояния из-за взаимодействия тепловой и магнитной неустойчивостей, в частности, экспериментально проверен критерий устойчивости к скачкам магнитного потока на сверхпроводниковом геликоиде с плоскими витками без введения в расчеты коэффициента теплоотдачи в качестве подгоночного параметра.

Модельные эксперименты с применением двух принципиально различных методик продемонстрировали ограниченную способность поглощения тепловых возмущений сверхпроводника сверхтекучим гелием в качестве хладагента.

Результаты экспериментальных и расчетных исследований влияния ВД, внесенных в СМ, на их устойчивость к тепловым и электромагнитным возмущениям имеют большое практическое значение. В частности метод внешнего легирования СМ небольшими количествами ВД используется в Институте Ядерной Физики СО РАН имени Г.И. Будкера (г. Новосибирск) при создании многополюсных сверхпроводниковых вигглеров для международных центров синхротронного излучения. Увеличение на порядок теплоемкости обмотки, достигаемое за счет введения в ее состав нескольких об. % веществ, теплоемкость которых в интервале температур (4–10 К) на 2–3 порядка превосходит теплоемкость обычных материалов СМ, значительно повышает надежность работы устройств в режиме инжекции электронов на максимальной энергии, предотвращая переходы СМ в нормальное состояние

при попадании в них заряженных частиц и нейтронов. Метод внешнего легирования СМ ВД использован в Объединенном Институте Ядерных Исследований (г. Дубна) при изготовлении экспериментального дипольного магнита с переменным режимом работы до 8 Тл/с в рамках работ по созданию российского коллайдера тяжелых ионов NICA (Nuclotron based Ion Collider Facility).

Экспериментальное и расчетное исследования значительного повышения стабильности композитных сверхпроводников с внутренним легированием их ВД привело к появлению нового класса теплостабилизированных сверхпроводников (приоритет подтвержден четырьмя патентами РФ).

Повышенная термомагнитная стабильность теплостабилизированных сверхпроводников (по критерию «адиабатической стабильности» на 70%) может решить проблему коллективных скачков магнитного потока в Nb_3Sn проводниках с высокой критической плотностью тока для модернизации магнитов Большого Адронного Коллайдера.

Теплостабилизированные сверхпроводники томографического типа с внутренним легированием ВД при использовании в СМ магниторезонансных томографов могут сократить и даже устранить дорогостоящий процесс тренировки при их вводе в эксплуатацию.

Разработанная простая и эффективная конструкция стабильного низкоомного узла соединения (спая) Nb-Ti проводников типа КВО с сопротивлением 4 нОм при токе 45 кА и поле $B = 1,5$ Тл, способного к работе в переменном режиме с $dB/dt = 0,3$ Тл/с, применена в первом индийском токамаке «SST-1».

В рамках работ по созданию первого корейского токамака «KSTAR» для компании «Samsung» автором сконструирован, при его определяющем участии изготовлен и испытан стабильный быстродействующий сверхпроводящий трансформатор на 50 кА ($dI/dt = 75$ кА/с) с возможностью достижения 100 кА при снижении скорости ввода тока до 10 кА/с.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработанная методика исследования стабильности массивного сверхпроводника — геликоида с плоскими витками, состоящими из множества расположенных в ряд, гальванически и механически связанных отдельных композитных сверхпроводников и полученные с ее помощью результаты:

- выявленная аномально сильная зависимость криостатической стабильности геликоида из сплава Nb-Ti от динамики магнитного потока в сечении проводника при вводе тока/поля и после его остановки;
- обнаруженное уникальное явление обратной динамики магнитного потока — вос-

становление первоначального распределения тока и поля по сечению после «ограниченного» скачка магнитного потока в малом объеме ($\sim 4\%$), связанного с тепловой неоднородностью охлаждаемого сверхтекучим гелием геликоида;

– влияние на криостатическую стабильность геликоида из Nb-Ti сверхпроводника «географии» (места положения) и «геометрии» (пространственного размера) возмущений;

– экспериментально определенные величины «критического» теплового потока в жидкий гелий в моменты скачков магнитного потока в геликоиде из Nb-Ti $q = (150 \pm 10) \text{ Вт/м}^2$;

– результаты проверки теории терромагнитной стабильности охлаждаемых сверхпроводников без подгоночных параметров.

2. Обнаружение и объяснение эффекта слабого влияния фазового состояния хладагента (от газообразного He и He-I при $T = 4,2 \text{ К}$ до He-II, насыщенного и недогретого ($P = 0,1 \text{ МПа}$ при $T = 1,9 \text{ К}$) на стабильность композитных сверхпроводников и модельных СМ в области транспортных токов, близких к критическому ($i = I/I_c \cong 0,7 \div 0,9$) и сильного влияния в области, близкой к стационарной стабильности ($i \cong 0,3 \div 0,5$).

3. Установленный эффект значительного увеличения стабильности низкотемпературных СМ с помощью разработанных методов введения в их состав высоко-теплостойких добавок:

– внешнего легирования, при котором несколько об. % мелкодисперсного порошка ВД вносят в межвитковый компаунд СМ;

– промежуточного легирования, когда ВД методом «порошок-в-трубе» вносят в медный проводник, который вводят в состав комбинированного сверхпроводника, например, спаивают с композитным сверхпроводником;

– внутреннего легирования, при котором жилы ВД по ампульной технологии вносятся непосредственно в состав композитного сверхпроводника.

4. Эффективная, простая в изготовлении, стабильная в переменном режиме работы с $dB/dt = 0,3 \text{ Тл/с}$ конструкция низкоомного узла соединения Nb-Ti проводников типа КВО для первого индийского токамака *SST-I* (в поле $B = 1,5 \text{ Тл}$, при токе 45 кА , и сопротивлении 4 нОм).

5. Разработанная методика сравнительного исследования стабильности образцов Nb-Ti субкабелей с различным покрытием единичных проводов и разным распределением стабилизирующей меди по сечению для выбора лучшего варианта проводника типа КВО для магнитной системы первого китайского токамака «*EAST*».

6. Конструкция стабильного быстродействующего сверхпроводникового трансформатора на 50 кА при скорости ввода тока 75 кА/с с возможностью достижения

тока 100 кА при снижении скорости до 10 кА/с (Техническое приложение).

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- Международных конференциях по криогенной технике и криогенным материалам (*ICEC, ICMC*): 1980 г. (Генуя, Италия), 1988 г. (Саутгемптон, Великобритания), 1990 г. (Пекин, Китай), 2004 г. (Пекин, Китай), 2007 г. (Читтануга, США), **(признан лучшим докладом на конференции).**
- Конференциях США по прикладной сверхпроводимости (ASC): 1998г. (Дезерт Спрингс), 2000 г. (Вирджиния Бич), 2002 г. (Хьюстон), 2004 г. (Джексонвилль), 2006 г. (Сиэтл).
- Международных конференциях по магнитной технологии (MT): 2001 г. (Генуя, Италия), 2005 г. (Женева, Швейцария).
- Всесоюзном семинаре по технической сверхпроводимости в ИАЭ 1981 г.
- 2-й Всесоюзной конференции по техническому использованию сверхпроводимости (Ленинград), 1983 г.
- Семинарах НИЦ «Курчатовский институт» 2007 ÷ 2011 гг.
- 4-й Всероссийской конференции по наноматериалам (Москва), 2011 г.
- 1-й Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости (Москва), 2011 г.

Публикации.

Результаты исследований, изложенных в диссертации, опубликованы в 40 работах, включая 20 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 5 патентов РФ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 288 страниц, включая 132 рисунка, 44 таблицы и списка литературы из 114 наименований.

Основное содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, раскрыты научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен литературный обзор, в котором рассмотрены наиболее важные работы по влиянию на стабильность временного и энергетического

«спектра возмущений», по разным причинам возникающих в СМ, и исследованию влияния на нее различных факторов. Проанализированы работы по исследованию методов повышения стабильности: улучшение условий охлаждения и использование энтальпийной стабилизации. Указаны направления продолжения исследований.

Вторая глава посвящена исследованию влияния на криостатическую стабильность массивного сверхпроводника динамики магнитного потока в сечении, «географии» (места приложения) и «геометрии» (пространственного размера) тепловых возмущений и экспериментальной проверке известного критерия термоманитной стабильности без подгоночных параметров. В качестве массивного сверхпроводника был использован сверхпроводящий геликоид, представляющий собой плоскую винтовую спираль (рис. 1), каждый виток которой состоит из множества параллельных композитных сверхпроводников, соединенных в единое целое, например, спаянных (Nb-Ti) или гальванически соединенных (Nb_3Sn). Конкретным объектом исследований служил геликоид с 71 плоским витком, внутренним радиусом 12 мм, наружным 29,5 мм, высотой 62 мм. Каждый виток состоял из 16 сверхпроводящих (Nb-Ti) и 16 медных проводов $\varnothing 0,5$ мм. В качестве межвитковой изоляции использовалась полиамидная пленка толщиной 40 мкм. Обмотка геликоида была плотно сжата, поэтому хладагент непосредственно контактировал только с цилиндрическими поверхностями обмотки.

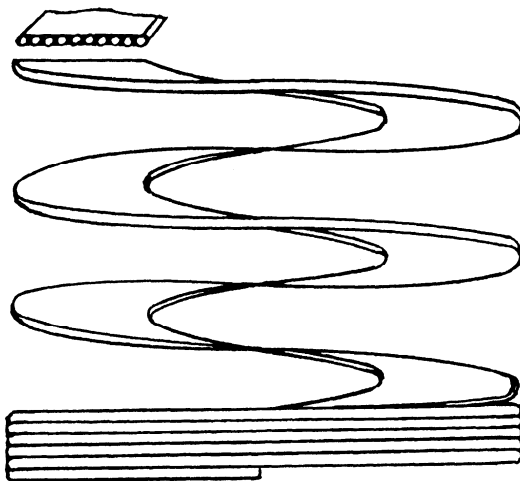


Рис. 1. Сверхпроводниковый геликоид.

На центральных витках были расположены: два точечных нагревателя (0,35% площади витка) в середине витка и на внутреннем радиусе; протяженный нагреватель, захватывающий площадь двух витков; датчики Холла для определения радиального и осевого распределений поля.

При исследовании криостатической стабильности тепловые возмущения моделировались разрядом конденсатора на нагреватели с характерным временем 0,9 мс. Было обнаружено, что критические энергии возмущений, переводящие геликоид в нормальное состояние, сильно зависят от того, когда подается импульс тепла: в режиме ввода тока или после остановки ввода.

На рис. 2 для нагревателя в середине витка представлена экспериментальная зависимость критической энергии возмущения, измеряемой с ошибкой в 2%, от промежутка времени между моментом остановки ввода тока и импульсом тепла. Здесь же приведена временная диаграмма показаний датчика Холла, расположенного в средней плоскости геликоида на 2/3 толщины обмотки (от центра).

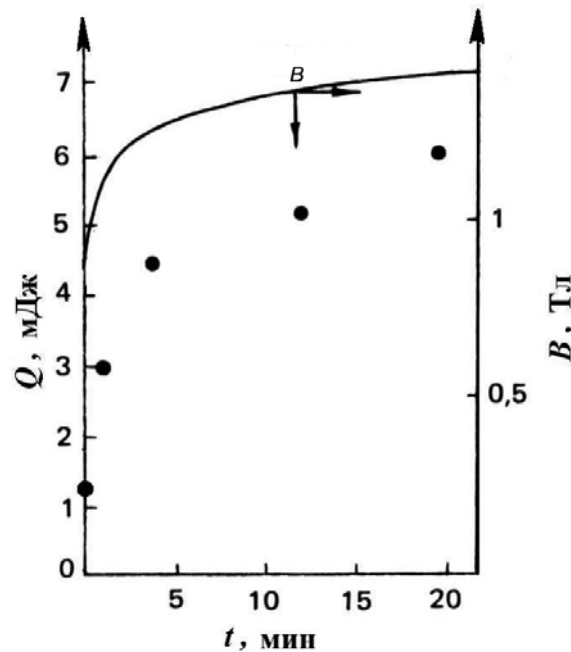


Рис. 2. Зависимости критической энергии теплового возмущения для точечного нагревателя в середине витка (•) и фиксируемого датчиком Холла магнитного поля на 2/3 толщины обмотки от времени после остановки ввода тока при $I = 3000$ А ($j = 2,45 \cdot 10^8$ А/м²), $\dot{I} = 9$ А/с; $\dot{B} = 1,1 \cdot 10^{-3}$ Тл/с.

Из рисунка видно, что после остановки ввода начинается перераспределение тока по сечению геликоида, приводящее к «размытию» профиля поля и, следовательно, к его увеличению на периферии обмотки, где расположен датчик, показывающий рост поля от 0,73 до 1,4 Тл. Этот процесс назовем «затуханием» критического состояния. Такова естественная динамика магнитного потока, т.е. перераспределение тока и поля по сечению массивного сверхпроводника после сброса практически до нуля продольного электрического поля. Поддерживаемый источником тока, уровень электрического поля обеспечивает постоянство радиального распределения тока в соответствие с длиной токового пути.

Ясно, что причиной «затухания» критического состояния является размытость вольт–амперной характеристики (ВАХ) сверхпроводника (если учитывать только продольную проводимость по меди, то характерное время перераспределения было бы не более сотой доли секунды). По оценкам с использованием экспериментального значения характерного времени «затухания» критического состояния $\sim 10^3$ с (см. рис. 2) уровень электрического поля составил $\sim 10^{-10}$ В/м, при этом дифференциальное электрическое сопротивление сверхпроводника меньше, чем у меди в $6 \cdot 10^4$ раз. Рост критических энергий со временем объясняется уменьшением локальной плотности тока в месте расположения нагревателя и соответственно увеличением критического запаса по температуре.

В режимах ввода тока при скоростях от 9 до 60 А/с ($1,1 \cdot 10^{-3} \div 7,3 \cdot 10^{-2}$ Тл/с) продольное электрическое поле составляет $(0,3 \div 2) \cdot 10^{-8}$ В/м, что гораздо больше, чем при естественной динамике магнитного потока. Возникает естественный вопрос, как вынужденная динамика магнитного потока, т.е. продвижение тока и электромагнитного поля внутрь геликоида, влияет на критические энергии при импульсах тепла в режиме ввода тока при достижении им определенного значения. В экспериментах была обнаружена аномально сильная зависимость критической энергии от скорости ввода тока (рис. 3), которая нашла объяснение в проведенных расчетах (А.А. Пухов, А.Л. Рахманов, 1993г.), в которых было показано, что развитие неустойчивости при слабой генерации тепла в динамическом режиме не может привести к стационарному состоянию активной среды. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о необходимости учета динамики магнитного потока в сечении сверхпроводника при рассмотрении его криостатической стабильности.

Влияние «географии» возмущений на стабильность исследовалось с помощью точечных нагревателей на внутреннем радиусе и в середине витка. Геликоид оказался в два раза устойчивее к возмущениям на внутреннем радиусе. Объясняется это тем, что критическое состояние устанавливается во всем сечении и критические температурные запасы примерно одинаковы для обоих нагревателей, а нестационарная теплоотдача от середины витка ограничена тепловым сопротивлением обмотки.

При исследовании «геометрии» возмущений сравнивались зависимости плотности критической энергии возмущений от плотности тока для протяженного («бесконечного») нагревателя, точечного нагревателя в центре витка и точечного нагревателя на одиночном ниобий – титановом проводе из состава геликоида, у которого гелием охлаждается половина периметра.

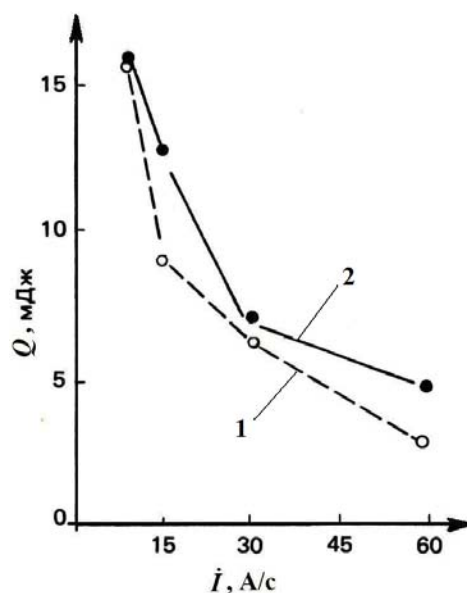


Рис. 3. Зависимость критической энергии теплового возмущения для точечных нагревателей от скорости ввода тока при достижении $I = 1500 \text{ A}$ ($j = 1,23 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$): 1 – центр; 2 – внутренний радиус.

Критические энергии нормировались на объем, захватываемый тепловым возмущением за характерное время действия нагревателя (рис. 4).

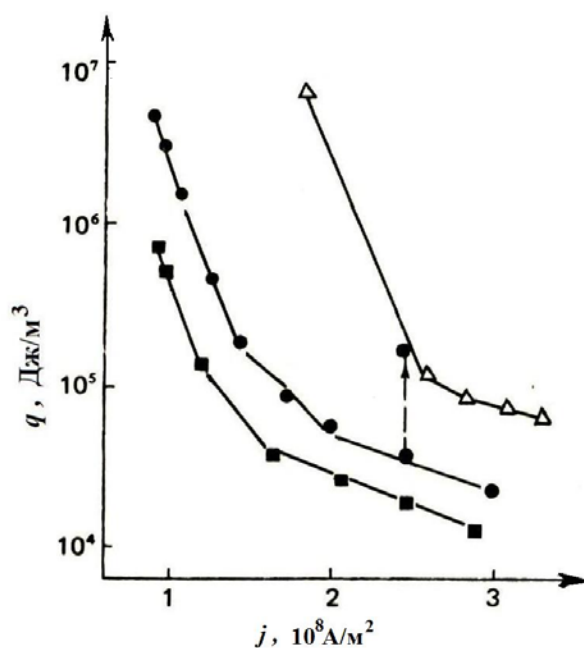


Рис. 4. Зависимость плотности критической энергии возмущений от плотности тока для различных нагревателей ($dI/dt = 9 \text{ A/s}$): ■ – «бесконечный» нагреватель; ● – точечный нагреватель в центре; Δ – точечный нагреватель на охлаждаемом одиночном композитном сверхпроводящем ниобий-титановом проводе $\varnothing 0,5 \text{ мм}$ в магнитном поле $B = 6 \text{ Тл}$.

На рис. 4 стрелкой показано увеличение критической энергии при «затухании» критического состояния в течение 20 мин. Видно, что устойчивость геликоида достаточно слабо зависит от «геометрии» возмущений; устойчивость одиночного сверхпроводящего провода выше за счет существенно лучшего охлаждения, а также более высокого критического запаса по температуре. По причине лучшего охлаждения область стационарной стабильности, где критические энергии неограниченно возрастают, у одиночного охлаждаемого сверхпроводящего провода выше более чем в два раза ($j \leq 1,8 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$), чем у геликоида ($j \leq 0,7 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$). Однако при «затухании» геликоид сравнивается по устойчивости к возмущениям с охлаждаемыми одиночными сверхпроводящими проводами.

Несмотря на крайне низкие критические запасы по температуре, у геликоида из-за высокой, практически критической, плотности тока в сверхпроводнике, ослабление устойчивости к локальным возмущениям компенсируется существенно более высокой объемной теплоемкостью (примерно в три раза выше) за счет свинца в припое и возможности двумерного распространения тепла (А.В. Гуревич и др., 1987 г.). Это, не слишком большое и объяснимое отличие критических энергий для геликоида и для проводов, из которых он состоит, в области, далекой от стационарной стабильности, позволяет сделать важный вывод об одинаковом механизме их перехода в нормальное состояние при возмущениях - создание локальной распространяющейся нормальной зоны, в отличие от развития скачка, провоцируемого возмущением с гораздо меньшей энергией $\sim 2 \cdot 10^2 \text{ Дж/м}^3$.

Для теоретических расчетов рассмотрим простое модельное представление геликоида полым бесконечным изотропным сверхпроводниковым цилиндром с внутренним радиусом r_1 и наружным r_2 с круговым транспортным током с плотностью j , растущей с постоянной скоростью (рис. 5). Справедливость модели была подтверждена измерением радиального распределения индукции магнитного поля в поперечном сечении в центре геликоида при помощи многопозиционного датчика Холла. Зафиксированный радиальный профиль $B(r)$ практически совпал с расчетным по модели критического состояния Кима–Андерсона, учитывающей зависимость критической плотности тока сверхпроводника от индукции магнитного поля (1963 г.). В соответствии с этой моделью, ток в сверхпроводнике протекает либо с критической, либо с нулевой плотностью тока. Поэтому, заполнение сечения полого сверхпроводникового цилиндра током и магнитным полем начинается с внутренней поверхности (см. рис. 5).

Критическая плотность тока сверхпроводящих проводов, используемых в геликоиде, описывается законом:

$$j_c = \frac{\alpha_c}{B + B_0}, \quad (1)$$

где $\alpha_c = 1,71 \cdot 10^9$ Тл·А/м²; $B_0 = 2,07$ Тл (усреднено по сечению геликоида).

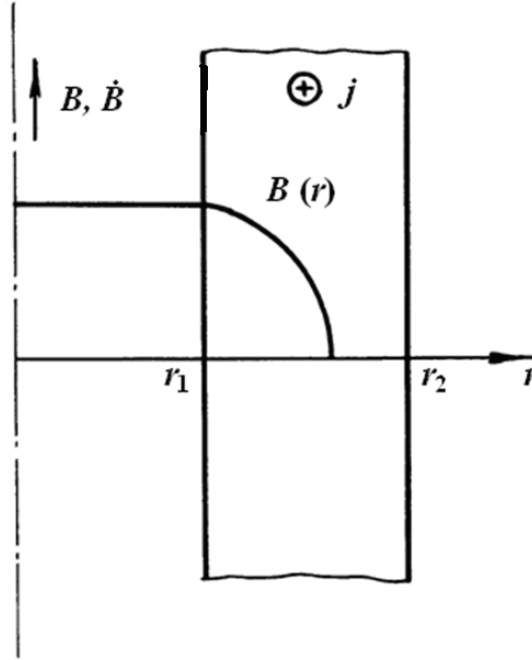


Рис. 5. Распределение магнитного поля по радиусу в модельном представлении сверхпроводникового геликоида бесконечным полым цилиндром.

Определим границу динамической стабильности геликоида, т.е. найдем связь между скоростью нарастания поля и полем, при достижении которого происходит скачок магнитного потока. Критерий устойчивости композитных сверхпроводников в динамическом приближении при $D_t/D_m \rightarrow \infty$ (где D_t – коэффициент температурной диффузии в радиальном направлении, D_m – коэффициент магнитной диффузии) с учетом экспоненциальной формы ВАХ сверхпроводника (Е.Ю. Клименко и др. 1980 г.): $E = E_c \exp(j/j_0 + T/T_0)$; E_c – const; j , T – плотность тока и температура; j_0 , T_0 – параметры нарастания по плотности тока и температуре, которые определяется экспериментально), получен Р.Г. Минцом и А.Л. Рахмановым в 1993 г. Для геликоида в модели полого цилиндра граница устойчивости определяется неравенством:

$$\int_V E j_c dV \leq h T_0 S, \quad (2)$$

где E – электрическое поле, h – коэффициент теплоотдачи, S – поверхность охлаждения.

Левая часть представляет собой мощность потерь. Обозначим величину «критического» (в момент возникновения скачка) теплового потока q , которая представляет собой произведение коэффициента теплоотдачи на характерный перегрев геликоида:

$$q = hT_0. \quad (3)$$

Она была определена экспериментально при сравнении мощности потерь на намагничивание в геликоиде, измеряемой калориметрическим способом, и теплового потока в хладагент в моменты скачков магнитного потока в процессе ввода тока и составила $q = (150 \pm 10) \text{ Вт/м}^2$. Найдя распределения магнитного и электрического полей из уравнений Максвелла и преобразовав выражение (2) с учетом (1) и (3), получаем выражение для границы терромагнитной (динамической) стабильности геликоида:

$$\dot{B} \leq \frac{2q\mu_0^2\alpha_c}{B^3(1+B_0/B)f} \left(\frac{r_1+r_2}{r_1} \right), \quad (4)$$

где $r_{1,2}$ – внутренний и внешний радиусы геликоида, f – параметр порядка 1, который в диапазоне B от 1 до 5 Тл изменяется от 1,07 до 1,67.

На рис. 6 сравнивается расчетная зависимость поля скачка магнитного потока B_j и тока перехода в нормальное состояние из-за скачка, пересчитанной с измеренным коэффициентом поле/ток $k = 1,222 \cdot 10^{-3} \text{ Тл/А}$, от скорости изменения магнитного поля $\dot{B}$ (4), с экспериментальными точками. Видно, что совпадение очень хорошее при $dB/dt < 0,15 \text{ Тл/с}$, и хуже при больших скоростях. Этот факт объясняется необходимостью учитывать теплоемкость (C) как стабилизирующий фактор, начиная с определенной границы $\dot{B}$, когда скорость диффузии электромагнитного поля $\dot{B}/j_0\mu_0$ превышает скорость теплоотвода с поверхности в хладагент h/C (Е.Ю. Клименко, Н.Н. Мартовецкий и С.И. Новиков, 1989 г.): $\dot{B} \geq j_0\mu_0 h/C$.

В нашем случае эта граница $\sim 0,18 \text{ Тл/с}$, что можно видеть на рис. 6. Максимальный ток перехода $I_{\text{эсп}} = 3920 \text{ А}$ был достигнут при скорости $1,5 \text{ А/с}$. Максимальный расчетный ток составил $I_{\text{расч}} = 4156 \text{ А}$ (различие 6 %). Расчетная зависимость получена без обычного для таких сравнений подгоночного параметра – коэффициента теплоотдачи h . При использовании соотношения $h = 60,8 q^{0,619}$ (Ю.А. Кириченко и К.В. Русанов 1983 г.), вычисленного на основе обобщения большого количества экспериментальных данных по теплоотдаче в He-I с медных поверхностей, удалось косвенно определить: $h = 1,35 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ и $T_0 = 0,11 \text{ К}$.

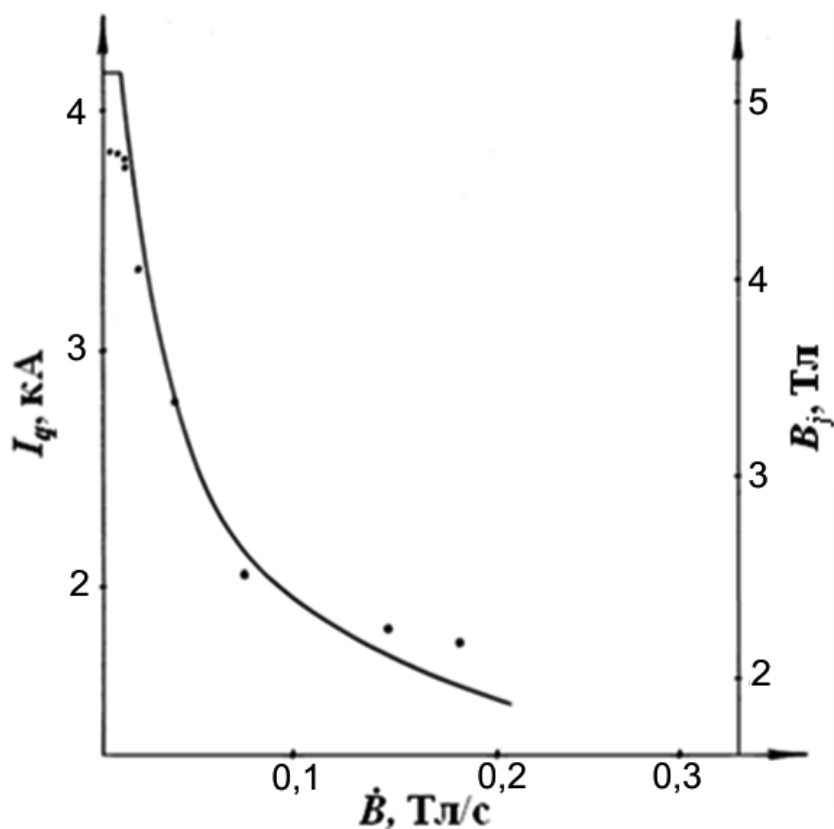


Рис. 6. Зависимость тока перехода в нормальное состояние, вызванного скачком потока, и поля скачка от скорости роста магнитного поля: — — расчет; • — эксперимент.

Хорошее совпадение значений параметра нарастания по температуре T_0 , определенных разными способами: первый — экспериментально с помощью ВАХ одиночного сверхпроводника геликоида ($T_0 = 0,13$ K); второй — как перегрева при определении «критического теплового потока» $q = 150$ Вт/м² в моменты скачков магнитного потока ($T_0 = 0,11$ K) позволяет оценить значение коэффициента теплоотдачи при скачках магнитного потока (при $\dot{B} \sim 0,1 \div 0,2$ Тл/с; $h = 1,35 \cdot 10^3$ Вт/м²К). Оно достаточно мало, а это означает, что теплоотдача осуществляется не в режиме пузырькового кипения, а до вскипания, в режиме однофазной конвекции. Таким образом, выбор одного значения подгоночного параметра h для расчетов термомагнитной стабильности во всем диапазоне скоростей изменения магнитного поля $\dot{B} \sim 0,1 \div 10$ Тл/с не обеспечивает адекватность расчета и эксперимента. Необходимо закладывать в расчеты не h , а зависимость $h(q)$.

Третья глава посвящена исследованию влияния условий охлаждения, в том числе сверхтекучим гелием, на стабильность композитных сверхпроводников.

При наличии непосредственного охлаждения проводников жидким гелием, их устойчивость к возмущениям возрастает за счет возможности отвода тепловой

энергии возмущения от проводника в хладагент, который может находиться в различных фазовых состояниях. Использование для охлаждения обмоток французского токамака «*Torus Supra*» и магнитов Большого Адронного Коллайдера сверхтекучего гелия, кроме увеличения критических параметров сверхпроводника, казалось бы, делает возможным диссипацию энергии возмущений в большом объеме He-II без возникновения локальных перегревов, характерных для теплопереноса в обычных жидкостях. Из литературы известно, что характеристики стационарного теплопереноса (коэффициент теплоотдачи, критический тепловой поток) в He-II выше в 2–5 раз, чем в He-I, аналогичное сравнение для нестационарного теплообмена, где основной характеристикой является энергия, снимаемая с единицы поверхности до начала пленочного кипения при заданном тепловом потоке, показывает, что, например, для $q=5 \cdot 10^4$ Вт/м², в He-II эта энергия в 50 раз больше чем в He-I. Поэтому возникла задача непосредственной проверки влияния сверхтекучести гелия на стабильность низкотемпературных сверхпроводников.

Для исследования влияния условий охлаждения на криостатическую стабильность использовались две совершенно разные методики: короткий образец с импульсным нагревателем и однослойная обмотка во внешнем магнитном поле с механическими напряжениями сверхпроводника 200÷500 МПа, что гарантировало естественную генерацию механотермических возмущений. По характеру тренировки однослойной обмотки можно оценить влияние различных состояний хладагента (от He газ при 4,2 К до He-II, насыщенного и недогретого при 0,1 МПа и 2 К) на стабильность обмотки.

Для исследования влияния условий охлаждения на терромагнитную стабильность использовался сверхпроводящий геликоид, хорошо моделирующий массивный сверхпроводник (см. главу 2).

Короткий образец представлял собой облуженный многожильный Nb-Ti провод в медной матрице Ø 0,5 мм и длиной 700 мм, намотанный бифилярно на текстолитовую катушку и контактирующий с хладагентом на половине периметра. На рис. 7 представлена зависимость критической энергии возмущений с характерным $\tau=2$ мс, моделируемых точечным нагревателем, от тока при различных состояниях хладагента: He I при 4,2 К; He-II насыщенный и недогретый при $T=2,05$ К. Видно, в области токов, близких к критическим, критические энергии примерно одинаковы. Этот результат противоречит представленному выше сравнению He-I и He-II. Поведение образца, охлаждаемого насыщенным и недогретым He-II, отличается только тем, что в последнем образец обладает более широкой областью стационарной стабильности по току.

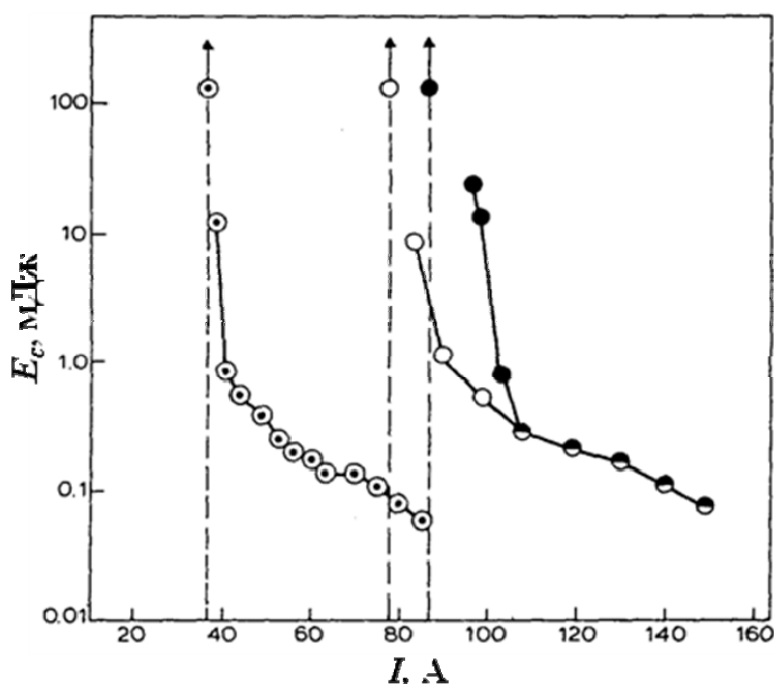


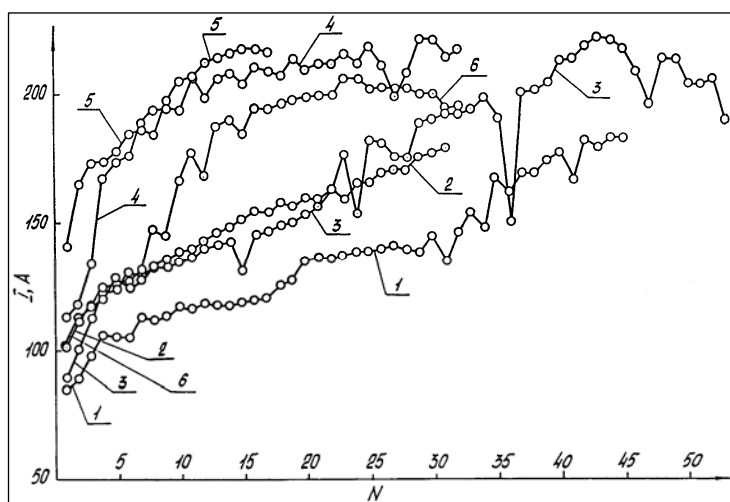
Рис. 7. Зависимость критической энергии возмущений от тока в коротком образце с импульсным нагревателем: $\odot$ – He-I, насыщенный, $T = 4,2$ К, $I_c = 97$ А; $\circ$ – He-II, насыщенный, $T = 2,05$ К; $\bullet$ – He-II, недогретый, $T = 2,05$ К, $I_c = 170$ А; ----- – минимальные токи распространения нормальной зоны для различных способов охлаждения, определенные методом низкоомного шунта (В.А. Альтов и др., 1984г.).

Объяснение факта примерного равенства критических энергий, для образца в He-I и He-II следует искать в более тщательном рассмотрении процессов нестационарного теплопереноса в гелий. Эти процессы определяются режимом проводимости Капицы и разность температур между нагретой поверхностью твердого тела и хладагентом пропорциональна сопротивлению Капицы R_k . Также известно, что проводимость Капицы h_k пропорциональна третьей степени температуры хладагента T_S : ($h_k = R_k^{-1} \sim T_S^3$).

Принципиальное различие нестационарного теплопереноса в He-I и в He-II при критических тепловых возмущениях сверхпроводника заключается в том, что диссипация импульса тепла от возмущения проходит в He-I в сверхпроводящем состоянии образца, а в He-II в нормальном состоянии, когда к тепловому потоку от возмущения добавляется еще и джоулева генерация. Например, для $E_c = 0,1$ мДж и относительном токе $i = I/I_c = 0,82$ (см. рис. 7) тепловые потоки в хладагент при возмущении составляют $1,24 \cdot 10^4$ Вт/м² в He-I и $4,45 \cdot 10^4$ Вт/м² в He-II. Тогда при оценке отношение снимаемых энергий до пленочного кипения $E_c(\text{He-II})/E_c(\text{He-I})=1,4$, вместо 50, что фактически совпадает с экспериментальным значением. Итак, переход на охлаждение He-II примерно в два раза повышает критические токи, но крио-

статическая стабильность по сравнению с He-I возрастает лишь на 40%. Это справедливо для области токов, близких к критическим ($i=0,7-0,9$; самая востребованная для практики область). Эти факты объясняются особенностями нестационарного теплопереноса, который осуществляется в режиме проводимости Капицы. Нестационарные коэффициенты теплоотдачи в He-II значительно ниже чем в He-I: $h_k(\text{He-II}; T=2 \text{ К}; P=0,1 \text{ МПа})=6 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ (С. Ван Скайвер, 1989 г.); $h_k(\text{He-I}; T=4,2 \text{ К})=5 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ (К. Шмидт, 1978 г.), поэтому при одном и том же тепловом потоке, переносимом в хладагент, нагревы образца в He-II существенно выше, чем в He-I. В области токов ($i=0,3-0,5$) условия стационарной стабильности в He-II наступают раньше чем в He-I.

Полученные на коротком образце результаты были подтверждены на экспериментах с модельной однослойной обмоткой ($\varnothing 170 \text{ мм}$, длина 200 мм, 330 витков, провод $\varnothing 0,5 \text{ мм}$, общей длиной 175 м). Обмотка помещалась во внешнее магнитное поле индукцией 5 Тл. Направление транспортного тока соответствовало суммированию внешнего и собственного полей. Опыты проводились при следующих состояниях хладагента: газообразный при 4,2 К, насыщенный He-I при 4,2 К, при 2,2 К (5,3 кПа), насыщенный He-II при 1,9–2,0 К (2,2–3,3 кПа), недогретый He-II при 1,9–2 К (0,1 МПа). Для определения влияния изоляции в одном из опытов с наружной стороны обмотки она была осторожно удалена (30% периметра провода). На рис. 8 представлена история тренировки обмотки при разных способах охлаждения. При 4,2 К обмотка выходила на максимум – ток короткого образца даже в газообразном He за существенно большее число шагов тренировки (45).



№	Фазовое состояние	Температура, К	Давление
1	He газ	4,2	0,1 МПа
2	He-I насыщен.	4,2	0,1 МПа
3	He-I насыщен.	2,2	5,26 кПа
4	He-II насыщен.	2,0	3,3 кПа
5	He-II недогрет.	2,0	0,1 МПа
6	He-II недогрет. Провод без изоляции	2,0	0,1 МПа

Рис. 8. Зависимость тока перехода в нормальное состояние механически напряженной модельной обмотки от номера ввода тока (тренировка) при различных условиях охлаждения.

Достигнутому току с учетом небольшого собственного поля обмотки ($1,75 \cdot 10^{-3}$ Тл/А) соответствует весьма высокое растягивающее напряжение 430 МПа (разрывное напряжение при 4,2 К составляет 1100 МПа). При более низких температурах независимо от состояния хладагента предельные токи обмотки составили ~ 220 А, что соответствует растягивающему напряжению 530 МПа. Критические токи короткого образца при таких температурах: 285 А при 2,2 К и 300 А при 1,9 К. Такая деградация (недобор тока до критического тока короткого образца проводника обмотки) вызвана наличием сильных возмущений механической природы. Чтобы проверить это, в одном из опытов в He-II при изменении направления тока на противоположное, когда обмотка прижимается к каркасу, критический ток был достигнут сразу без тренировки. На начало и количество шагов тренировки положительное влияние оказывает охлаждение He-II по сравнению с He-I (диаграммы 2 и 5, см. рис. 8), что согласуется с опытами на коротком образце, поскольку в этой области токов охлаждение He-II существенно влияет на устойчивость сверхпроводящего состояния к тепловым возмущениям.

Итак, эксперименты, проведенные по различным методикам (короткий образец с импульсным нагревателем и однослойная обмотка с высоким уровнем механических напряжений), приводят к главному результату – условия охлаждения слабо влияют на стабильность сверхпроводников и СМ из них в области токов, близких к критическим, и наоборот, сильно в области токов, близких к условиям стационарной стабильности, когда любая возникшая нормальная зона схлопывается. Переход к сложному и дорогостоящему способу охлаждения СМ недогретым сверхтекучим гелием главным образом обусловлен увеличением критического тока примерно в два раза при заданном магнитном поле. Такой переход наиболее эффективен для сверхпроводника на основе сплава Nb-Ti. Однако результаты проведенных исследований показали, что от эффекта сверхтекучести адекватного увеличения криостатической стабильности не наблюдается.

Влияние охлаждения сверхтекучим гелием на термомагнитную стабильность исследовалось на Nb-Ti сверхпроводящем геликоиде. На Рис. 9 представлены зависимости тока перехода I_q и поля скачка магнитного потока B_j от скорости ввода поля при различных состояниях хладагента: He-I недогретый и насыщенный при 2,2 К и He-II недогретый и насыщенный при 2,13 К, т.е. непосредственно перед и после перехода в сверхтекучее состояние.

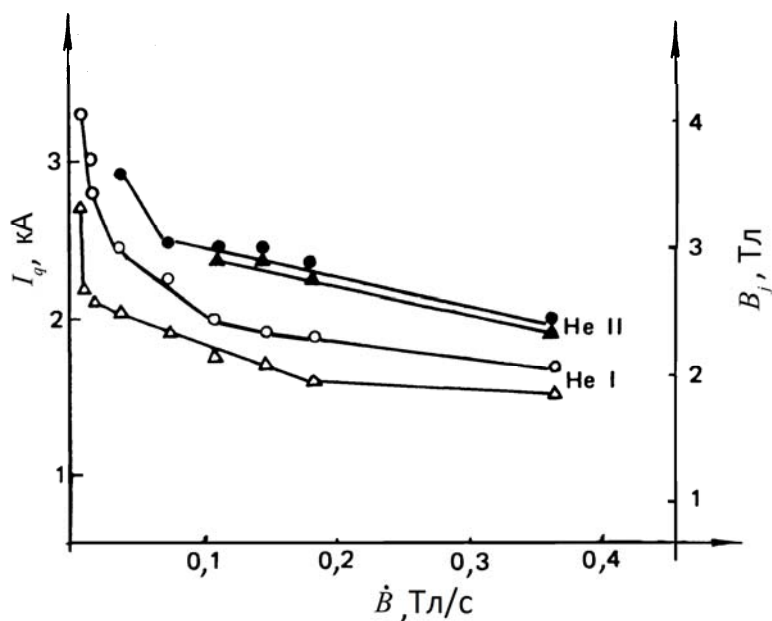


Рис. 9. Зависимость величины тока перехода в нормальное состояние, вызванного скачком потока, от скорости ввода поля при различных состояниях хладагента: Δ – 2,2 К недогретый при 0,1 МПа; $\circ$ – 2,2 К насыщенный; $\bullet$ – 2,13 К насыщенный; $\blacktriangle$ – 2,13 К недогретый.

Наблюдаемый эффект влияния сверхтекучего состояния гелия на B_j невелик и составляет 26÷44 % в зависимости от скорости dB/dt . Скачки потока происходят в двух центральных витках геликоида с наклеенным на них протяженным нагревателем, которые, поэтому, представляют собой тепловую неоднородность. У них значительно уменьшена поверхность охлаждения по сравнению с остальными плоскими витками геликоида при проникновении He-II в его толщу. Столь малое увеличение термомангнитной стабильности от эффекта сверхтекучести определяется чуть более высоким коэффициентом теплоотдачи в режиме проводимости Капицы в He-II по сравнению с однофазной конвекцией в He-I.

Четвертая глава посвящена исследованию повышения устойчивости сверхпроводящего состояния в сверхпроводниковых магнитах посредством метода энтальпийной стабилизации с помощью ВД, в качестве которых использовались интерметаллические соединения и керамики из редкоземельных металлов с экстремально высокой теплоемкостью при гелиевых температурах. Для общности терминологии условно назовем этот метод – методом внешнего легирования СМ высоко-теплоемкими добавками. На рис. 10 представлены температурные зависимости теплоемкости некоторых ВД и конструкционных материалов СМ (выделена кривая для Gd_2O_3 , которая наиболее приемлема по цене и доступности).

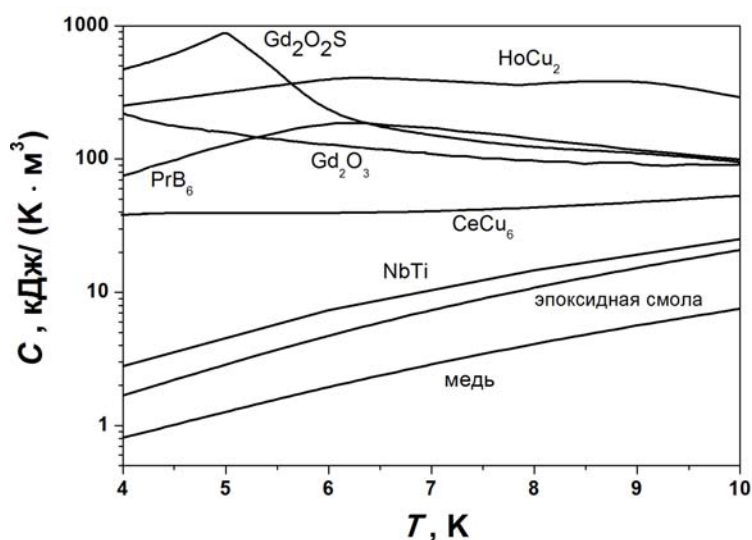


Рис. 10. Теплоемкости различных высокотеплоемких добавок (ВД) и конструкционных материалов СМ.

Метод внешнего легирования заключался в следующем. Несколько объемных процентов мелкодисперсного порошка ВД вносились в межвитковое пространство СМ в смеси с эпоксидной смолой. Из двух типов стандартных Nb-Ti проводов Ø 0,85 мм (число СП волокон 2970, либо 8910) были намотаны 4 небольших модельных соленоидов ($\varnothing_{\text{внутр.}} = 23$ мм, $\varnothing_{\text{внеш.}} = 48$ мм, $h = 50$ мм) с различными ВД. Контрольные СМ содержали порошок стандартного наполнителя – нитрида бора BN-2970 и BN-8910 (здесь и далее соленоиды обозначаются по наполнителю и числу жил в проводнике), легированные – 5 об.% керамики $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$, теплоемкость которой при температуре жидкого гелия почти в 600 раз превосходит теплоемкость меди (см. рис. 10). Введение добавки при 4,2 К привело к девятикратному увеличению объемной теплоемкости легированной обмотки, рассчитанному по закону смеси.

В экспериментах центральные витки обмотки с добавкой подвергались воздействию быстропеременного поперечного магнитного поля (частота ~ 300 Гц, характерное время затухания импульса $\sim 7,4$ мс), создаваемого разрядом конденсаторной батареи на встречные возмущающие медные катушки, расположенные внутри тестируемого СМ. При нескольких фиксированных значениях транспортного тока подбиралось минимальное напряжение на конденсаторе, приводящее к переходу тестируемой обмотки в нормальное состояние. Методическая ошибка измерений критической энергии, запасаемой в конденсаторе, была выбрана из разумного времени и цены эксперимента и составила 4 %. Непосредственное сравнение критических энергий колебательного контура показало существенное (до 80 %) увеличение устойчивости легированного СМ по сравнению с обычным. Такое

сравнение показывает только соотношение стабильностей СМ с ВД и контрольного без ВД (лучше, хуже), которое ничего не говорит об эффективности использования добавленной теплоемкости. Гораздо ценнее сравнение рассчитанных тепловыделений от электромагнитных возмущений, которые можно будет сравнить с разностью энтальпий образцов при нагреве. Исследование основывалось на сравнении реальных тепловыделений в СМ с ВД и без них (сумма кооперативных и гистерезисных потерь в композитном сверхпроводнике, усредненная в объеме обмотки) с максимальной теплопоглощающей способностью соленоидов в адиабатическом приближении. При этом учитывался эффект ослабления магнитного поля внутри скрученного композита за счет наведения экранирующих токов, протекающего во внешних сверхпроводящих волокнах (М. Уилсон, 1985 г.).

На рис. 11 приведено сравнение максимальной теплопоглощающей способности (линии) и критических энергий СМ с ВД и без них, вычисленных из экспериментальных данных (точки) в зависимости от транспортного тока. Видно, что вместо расчетного четырехкратного увеличения стабильности, экспериментально удалось достичь повышения критических энергий только на 80%.

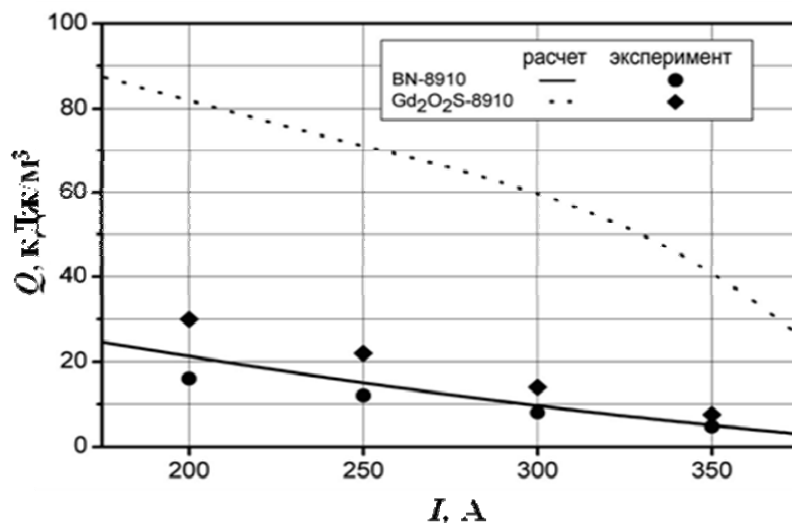


Рис.11. Сравнение вычисленных из эксперимента критических энергий модельных NbTi СМ с внешним легированием 5 % ВД Gd₂O₂S и без него с теплопоглощающей способностью обмоток.

Очевидной причиной этого эффекта является слишком большая (по сравнению со временем возмущения) постоянная времени температурной диффузии от сверхпроводника к ВД. Поэтому естественным продолжением работ стал поиск порогового времени возмущения, начиная с которого метод внешнего легирования ВД становится более эффективным.

Эксперименты с возмущениями разной продолжительности $0,2 \div 34$ мс (время затухания импульса) проводились по прежней схеме с той лишь разницей, что в зависимости от соотношений параметров колебательного контура переходной процесс носил либо колебательный, либо апериодический характер. На рис. 12 показаны вычисленные из экспериментальных данных критические энергии соленоидов Gd_2O_2S -8910 и BN-8910 при температурном запасе сверхпроводника $0,25$ К ($I/I_c = 0,96$) в зависимости от характерного времени затухания электромагнитных колебаний τ . Там же обозначены уровни максимальной теплопоглощающей способности легированной и контрольной обмоток и Nb-Ti провода без эпоксидной смолы и изоляции в адиабатическом пределе.

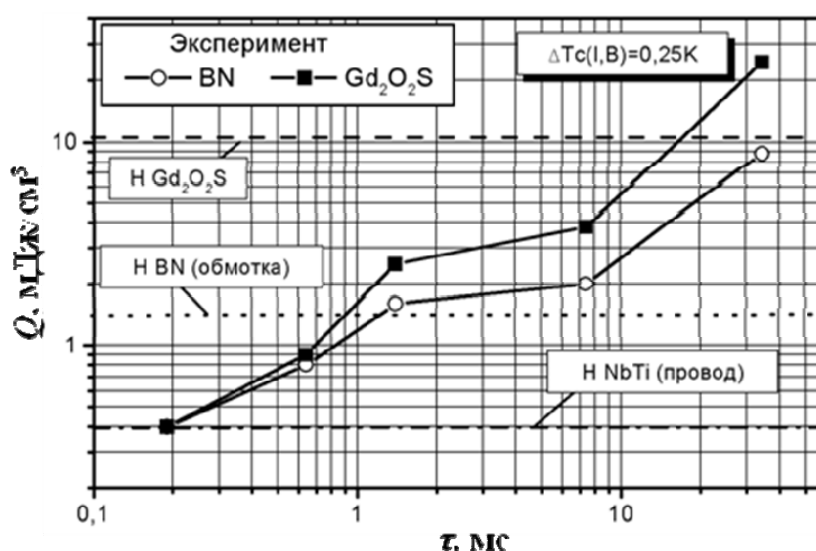


Рис. 12. Зависимость критической энергии обмоток Gd_2O_2S -8910, BN-8910 от продолжительности возмущения при критическом температурном запасе сверхпроводника в $\Delta T_c(I,B) = 0,25$ К; H – разность энтальпий при $4,2$ К и критической температуре сверхпроводника, зависящей от транспортного тока и магнитного поля.

Из рис. 12 видно, что при малой продолжительности возмущения $\sim 0,2$ мс эффект от введения ВД отсутствовал, поскольку выделяющаяся от электрических потерь энергия в обеих обмотках воспринималась только металлом проводника (совпадение критической энергии с максимальной теплопоглощающей способностью Nb-Ti провода), и гранулы ВД не участвовали в процессе поглощения тепла. Обмотка контрольного СМ BN-8910 прогревалась полностью, начиная с характерного времени возмущения $\tau \sim 1$ мс, в то время как для легированного магнита это значение оказалось равно ~ 20 мс (на рис. 12 точки совпадения тепловыделений в СМ с ВД и без них с соответствующими теоретическими приращениями энтальпии обмоток). При более продолжительных возмущениях тепло частично уходило че-

рез боковую поверхность обмотки в жидкий гелий. Максимальное увеличение критических энергий магнита $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S-8910}$ по сравнению с контрольным СМ без добавок составило ~ 3 раза.

Важным вопросом является влияние ВД на стабильность СМ в переменном режиме работы с большими временами электромагнитных возмущений (1 – 4 с) в виде электрических потерь в проводнике СМ. На рис. 13 представлены скоростные зависимости тока перехода для четырех модельных СМ. Расчетные кривые были получены из решения нестационарного уравнения теплопроводности для обмотки с усредненными физическими параметрами, разогревающейся под действием электрических потерь в изменяющемся собственном магнитном поле. Расчетные кривые находятся в удовлетворительном совпадении с экспериментом для всех СМ, кроме контрольного BN 2970, у которого обнаружено аномальное поведение при скорости > 4 Тл/с. Естественным объяснением такого поведения является возникновение в центральных витках скачков магнитного потока собственного поля проводника. В то же время в обмотке с ВД $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S} - 2970$ таких скачков не было. Это свидетельствует о способности ВД подавлять развитие терромагнитных неустойчивостей, что является весьма важным результатом. Рост токов перехода, вызванных нагревом до критической температуры из-за потерь у СМ с ВД составил 25–55 % при скоростях ввода поля 15–16 Тл/с. Эти факты свидетельствуют о перспективности использования ВД в СМ с динамическими режимами работы.

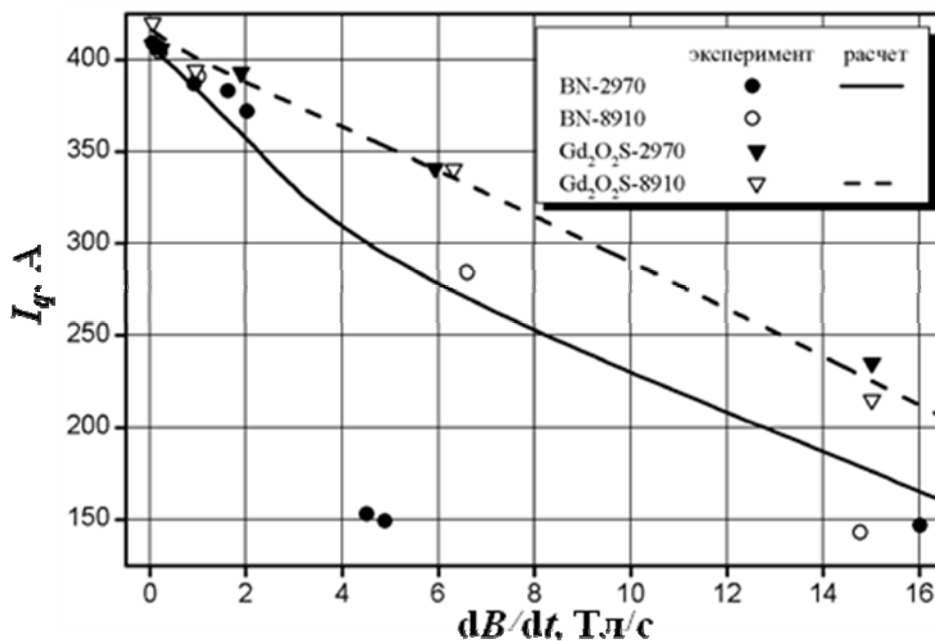


Рис. 13. Экспериментальные и расчетные скоростные зависимости токов перехода в нормальное состояние СМ с внешним легированием ВД и без него.

Еще одним направлением исследований стали сравнительные измерения устойчивости сверхпроводящего состояния в Nb-Ti обмотках из резерфордовского кабеля (одноповивная плоская скрутка $1,44 \times 4,64 \text{ мм}^2$ с шагом 50 мм, 10 Nb-Ti проводов $\varnothing 0,85 \text{ мм}$, число волокон 8910, коэффициент заполнения по Nb-Ti 42 %) при максимально допустимых скоростях изменения собственного магнитного поля с помощью внешнего легирования 3 об.% ВД CeCu_6 , HoCu_2 . Эпоксидная смола с добавками наносилась на поверхность кабеля перед его изолированием. Введение 3 об. % ВД соответствовало увеличению средней теплоемкости обмоток в 1,5 и 4,5 раза для ВД CeCu_6 и HoCu_2 соответственно. В сравнительных опытах были сняты экспериментальные зависимости токов перехода I_q в нормальное состояние легированных и контрольной обмоток при различных скоростях ввода тока (время нарастания собственного поля менялось в пределах 1–30 с). Для получения расчетных скоростных зависимостей $I_q(\dot{i})$ (рис.14) было решено уравнение теплового баланса в адиабатическом приближении. Вклад кооперативных потерь в кабеле резерфордовского типа, связанных с перетеканием экранирующих токов между проводами скрутки, в суммарную мощность электрических потерь в зависимости от скорости ввода тока составлял от 5 до 30% (А.В. Злобин и др., 1982 г.). Удовлетворительное совпадение расчета с экспериментом (см. рис.14) свидетельствует о полной реализации повышенной теплоемкости легированных обмоток при продолжительности тепловыделений $> 1 \text{ с}$.

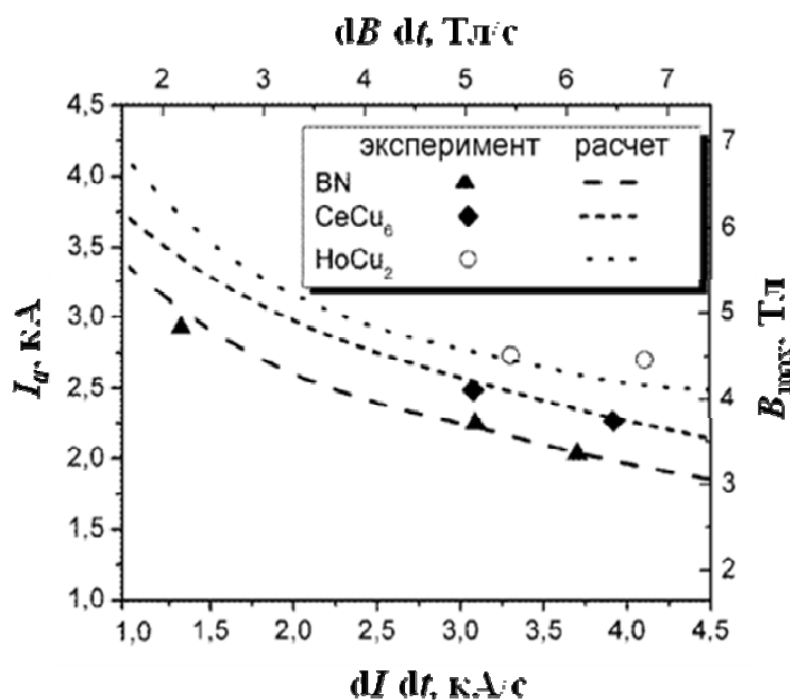


Рис. 14. Сравнение расчетных и экспериментальных скоростных зависимостей достигнутых токов овальных Nb-Ti обмоток из резерфордовского кабеля с внешним легированием ВД и без него.

Эффект от внешнего легирования ВД становится более ощутимым при следующей формулировке: для достижения одного и того же значения собственного поля (например, 4 Тл), в обмотку с 3 об. % ВД CeCu_6 оказалось возможным ввести ток на 25 % быстрее ($\dot{B} \sim 5$ Тл/с), чем в контрольную ($\dot{B} \sim 4$ Тл/с), а в обмотку с таким же количеством HoCu_2 – уже на 75% быстрее ($\dot{B} \sim 7$ Тл/с).

Продemonстрированная возможность увеличения допустимых скоростей ввода тока в СМ из резерфордовского кабеля с высоким уровнем электрических потерь делает предложенный метод перспективным при изготовлении дипольных магнитов для ускорителей заряженных частиц, особенно, учитывая, что альтернативные возможности увеличения их стабильности практически исчерпаны.

Пятая глава посвящена исследованию метода «промежуточного» легирования СМ ВД, ставшего следующим шагом к увеличению температуропроводности от сверхпроводника к ВД. По инициативе Курчатовского института во ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара была разработана технология изготовления медных проводов с одной или несколькими ВД жилами. Главная цель работ с «промежуточным» легированием заключалась в том, чтобы показать принципиальную возможность внесения хрупких добавок внутрь провода методом «порошок в трубе».

В Курчатовском институте были проведены сравнительные эксперименты. Короткие образцы, представляющие собой стандартные Nb-Ti сверхпроводники ($\varnothing$ 0,85 мм, 2970 СП волокон), спаянные оловянно-свинцовым припоем с медными проводами того же диаметра, содержащими 1 ($\varnothing$ 0,6 мм) или 19 ($\varnothing$ 0,1 мм) жил различных ВД (CeCu_6 , CeAl_2 , HoCu_2 , PrB_6 , $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$) в количестве 5 – 20 % по объему медного провода, подвергались воздействию продольных импульсов переменного магнитного поля разной длительности 40–1200 мкс и частоты 0,3–13 кГц во внешнем поперечном поле индукцией 1,5–3 Тл. Также был изготовлен контрольный образец, в котором Nb-Ti провод был спаян с медным проводом без ВД.

Поскольку экспериментальные образцы содержали различное количество меди разного качества, прямое сравнение критических энергий возмущающего контура оказалось невозможным. Для адекватного сравнения полученных данных была разработана методика расчета тепловыделений от электромагнитных возмущений в коротких образцах токонесущих элементов. Для каждого типа проводов критическая энергия тепловыделений рассчитывалась с учетом экранировки магнитного поля внутри проводника (аналитические выражения в виду их громоздкости не приводятся). На рис. 15 показаны результаты расчетов, полученные на основе экспериментальных данных, иллюстрирующие влияние характерного времени возмущения на критическую энергию трех теплоизолированных образцов: кон-

трольного без добавок, и двух 19 жильных образцов с ВД HoCu_2 и PrB_6 в сравнении с их теоретической теплопоглощающей способностью (пунктирные линии). Видно, что полное использование добавленной теплоемкости начинается при характерных временах возмущений > 1 мс. Максимальный рост критических энергий легированных проводников составил 3,5 раза по сравнению с контрольным образцом. Одножильные образцы продемонстрировали крайне малую прибавку в стабильности из-за слишком большого времени прогрева толстой ВД жилы.

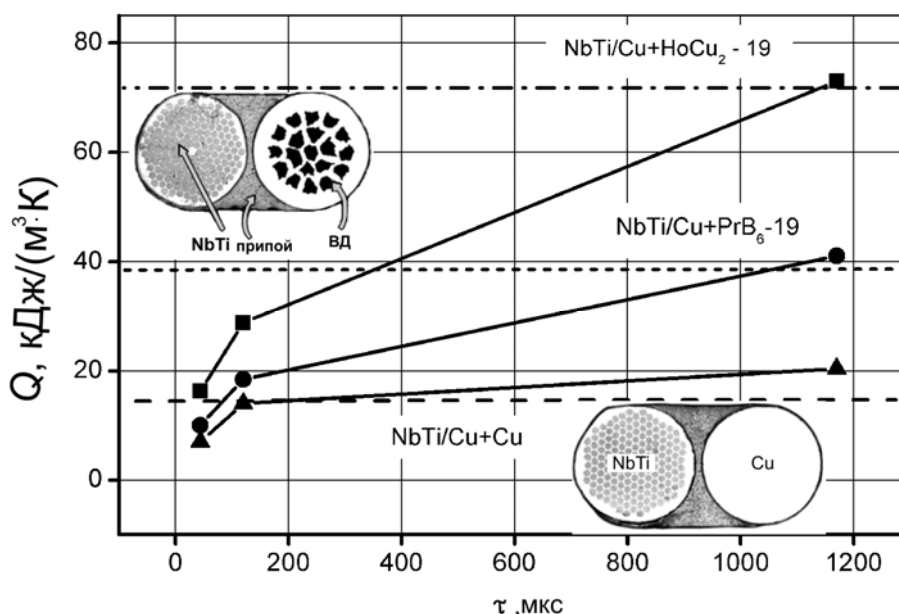


Рис.15. Результаты сравнительных опытов по определению критических энергий тепловых возмущений Nb-Ti комбинированных проводников с «промежуточным» легированием ВД.

При охлаждении половины периметра образцов жидким гелием эффект увеличения критических энергий за счет введения добавки сохранился, хотя и несколько снизился (до 2,5 раз) (рис. 16).

Разработка технологии «промежуточного» легирования позволила осуществить важный шаг: была показана возможность изготовления длинномерных проводов (Cu+ВД). Вычисление прямых критических энергий образцов показало, что пороговое значение продолжительности возмущения, соответствующее полному использованию добавленной теплоемкости, сместилось с ~ 20 мс при внешнем легировании до ~ 1 мс для 19-жильных образцов с медью высокой чистоты. Предложенный метод, будучи особенно эффективным в плотных обмотках СМ, остается целесообразным и для хорошо охлаждаемых обмоток.

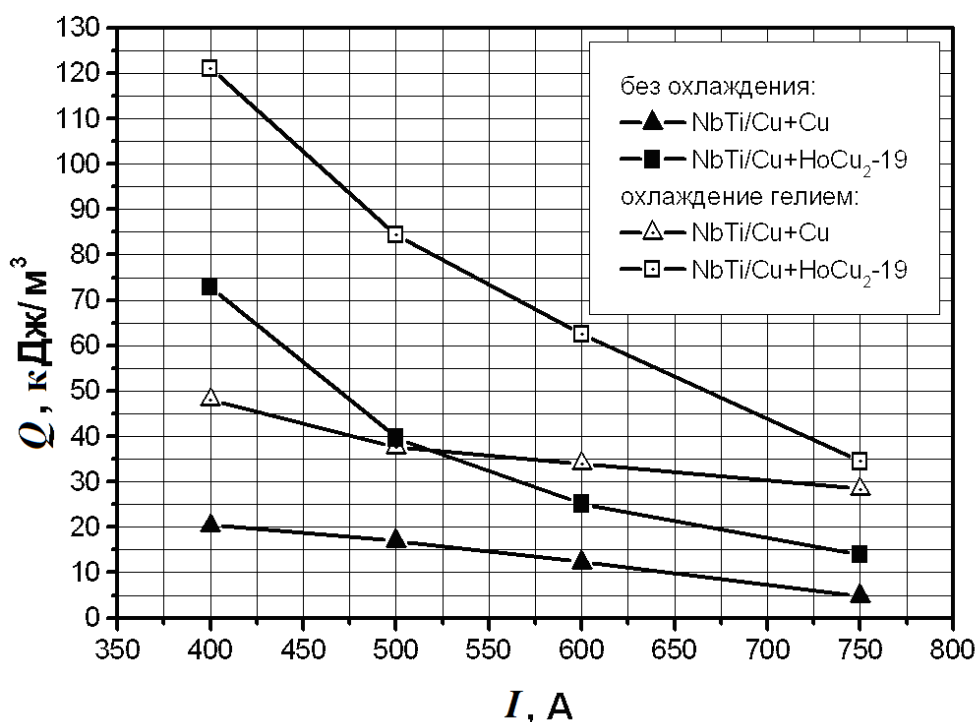


Рис. 16. Зависимость критической энергии Nb-Ti комбинированных проводников с «промежуточным» легированием от транспортного тока при охлаждении жидким гелием и в адиабатических условиях, $B = 1,5$ Тл, $\tau = 1,2$ мс.

В шестой главе изложены результаты исследования совершенно нового типа композитных сверхпроводников, содержащих ВД жилы непосредственно в проводе. После получения обнадеживающих результатов на комбинированных сверхпроводниках с «промежуточным» легированием, по инициативе Курчатовского института во ВНИИНМ имени А.А. Бочвара был разработан метод внутреннего легирования композитных Nb-Ti и Nb₃Sn проводов, близких по конструкции к проводникам для ИТЭР. Провод Nb₃Sn содержал ВД PrB₆, в виде 35 мкм кольцевого слоя, расположенного между Nb барьером и наружной медной оболочкой (Ø провода 0,82 мм, число сверхпроводящих волокон – 4420, коэффициент заполнения по сверхпроводнику – около 11 % после диффузионного отжига, объемная доля ВД – 7 %); NbTi + ВД Gd₂O₂S в виде 13 жил толщиной 10–70) мкм, сосредоточенных в центре проводника в медной матрице (Ø провода 0,73 мм, число сверхпроводящих волокон – 4242, коэффициент заполнения по сверхпроводнику – около 38 %, объемная доля ВД – 5 %). Также были изготовлены контрольные провода, идентичные легированным, но без ВД (рис. 17).

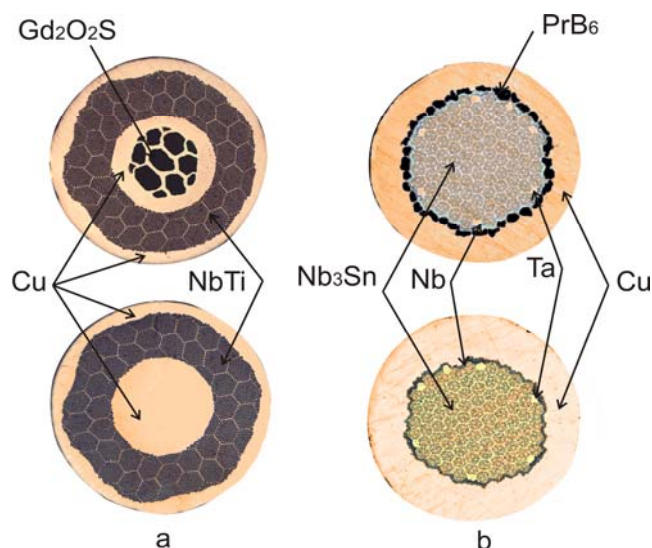


Рис. 17. Сечения Nb_3Sn и Nb-Ti проводов «ИТЭРовского» типа с внутренним легированием ВД.

Измеренная теплоемкость провода $\text{Nb}_3\text{Sn}+\text{PrB}_6$ при 4,2 К увеличилась по сравнению с нелегированным образцом – в 7 раз, а у провода $\text{Nb-Ti}+\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ – также измеренная, в 9 раз. Были проведены сравнительные опыты по определению устойчивости теплоизолированных образцов сверхпроводников с внутренним легированием и без него к продольным возмущающим импульсам магнитного поля, создаваемым при разряде конденсатора на резистивную катушку, окружающую образец (частота 300 Гц, время затухания возмущения – 1,1 мс), в поперечном поле с индукцией 3 Тл.

Рост критических энергий у легированных проводов по сравнению с контрольными без ВД составил 5–6 раз для Nb_3Sn , и до 4 раз для Nb-Ti (при приближении к I_c). Сравнение тепловыделений в проводах с теплопоглощающей способностью проводников показано на рис. 18. Проводники $\text{Nb}_3\text{Sn}+\text{PrB}_6$ оказались в 1,5 раза более стабильными, чем предсказывал расчет. Это связано с наличием теплового сопротивления между внешней стабилизирующей медной оболочкой и сверхпроводящей зоной, роль которого играл 35 мкм кольцевой слой ВД PrB_6 . Наличие такого теплового сопротивления позволяло стабилизирующей медной оболочке, в которой происходил основной нагрев вихревыми токами при возмущениях, перегреваться относительно сверхпроводящей зоны на 2 К, что приводило к росту критических энергий выше вычисленных, полученных при условии равенства температур меди и Nb_3Sn критической температуре (см. рис. 18, а). В случае Nb-Ti проводников, напротив, на эксперименте не удалось достичь расчетного увеличения стабильности (см. рис. 18, б).

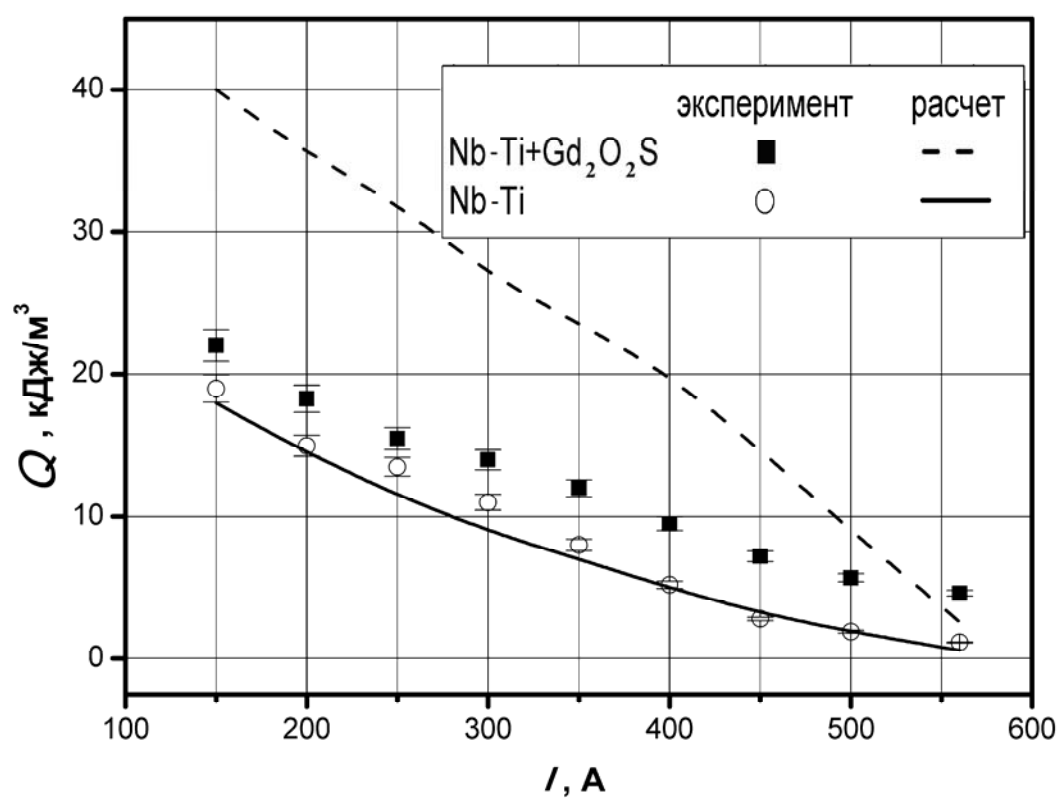
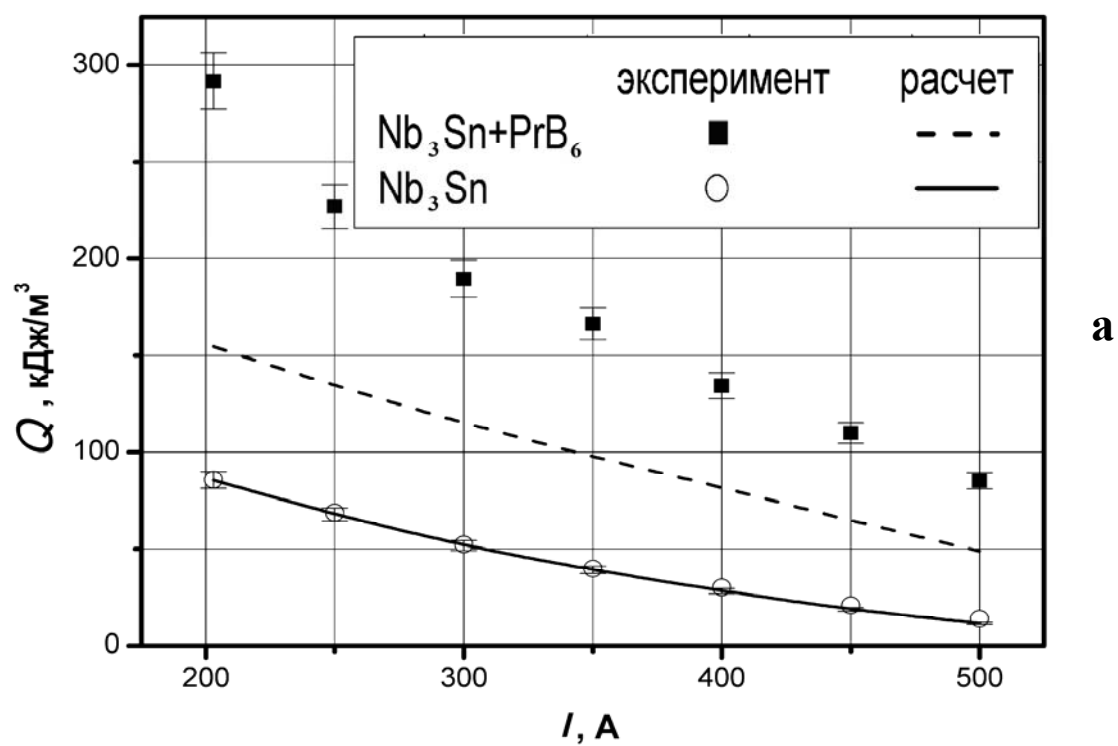


Рис. 18. Сравнение токовых зависимостей экспериментальной критической энергии и теоретической теплопоглощающей способности Nb_3Sn (а) и Nb-Ti (б) проводов с внутренним легированием ВД и без него.

Было также проведено сравнительное исследование терромагнитной стабильности проводов с ВД. Образцы представляли собой 4 однослойных соленоида с пропаянными витками (модельно соответствующие длинным полым сверхпроводящим цилиндрам), намотанные из проводов с ВД и без них и размещенные во внешнем магнитном поле, возрастающем с постоянной скоростью до 15 Тл/с. Это поле наводит в образцах – соленоидах экранирующий ток, замыкающийся в поперечном к виткам направлении с малым сопротивлением ~ 2 мкОм, которое практически не влияет на процесс полного экранирования. При скачке магнитного потока внешнее поле быстро проникало в центр образца, нагревая его до критической температуры. Для оценки эффективности добавленной теплоемкости при развитии скачка магнитного потока был выполнен расчет индукции магнитного поля, соответствующего скачку магнитного потока B_j в рамках критерия «адиабатической стабильности» сверхпроводников (Р. Хэнкок, 1965 г.):

$$B_j = 0,5\pi\sqrt{\mu_0 C(T_c - T_0)} \quad , \quad (5)$$

где C , T_0 и T_c – объемная теплоемкость, начальная и критическая температуры проводника. Смысл этого критерия в следующем: если перепад индукции магнитного поля в сечении сверхпроводника меньше B_j , то он будет устойчив к скачкам магнитного потока при любых скоростях изменения внешнего или собственного магнитного полей. На рис. 19 приведено сравнение экспериментальных значений B_j с расчетом для Nb_3Sn проводов с ВД и без нее. Поскольку теплоизоляция образцов не обеспечивала полной адиабатичности процессов, то при малых скоростях роста поля наблюдается характерная для охлаждаемых образцов падающая зависимость B_j (dB/dt). При более высоких скоростях изменения поля значения B_j выходят на постоянную величину (для контрольного образца соответствующую «адиабатическому» критерию стабильности, для образца с ВД – существенно ниже из-за неполного использования теплоемкости). Увеличение значений поля скачка для образца ($\text{Nb}_3\text{Sn}+\text{PrB}_6$) составило 70 % при максимально возможном в 2,5 раза. У образца ($\text{Nb-Ti}+\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$) увеличение составило лишь 10 % из-за сильного различия характерных времен прогрева ВД (время прогрева толстых жил $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S} \sim 1$ мс, в случае более тонких жил $\text{PrB}_6 \sim 20$ мкс, что гораздо ближе к характерным временам развития терромагнитных неустойчивостей $\sim 10\text{--}100$ мкс).

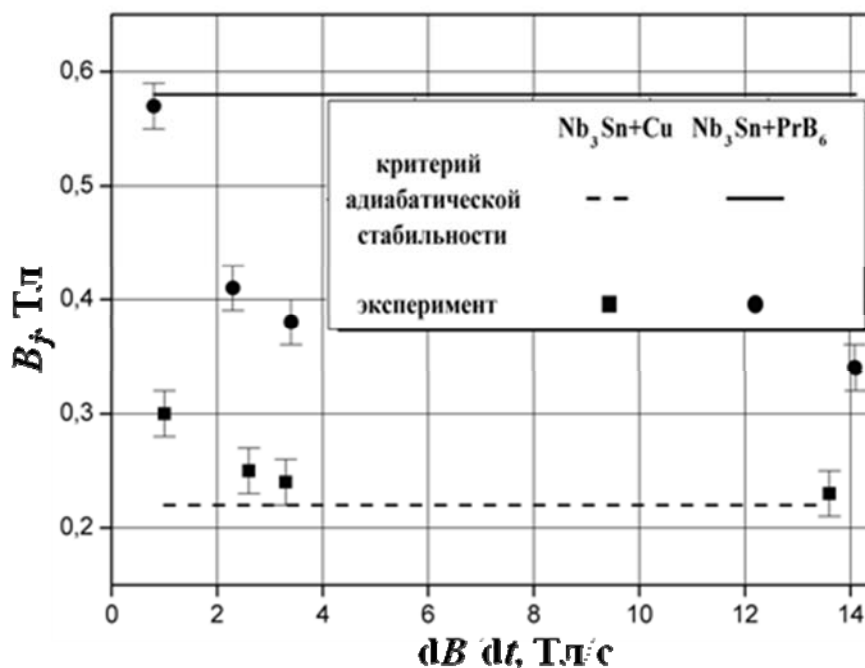


Рис. 19. Зависимость поля скачка магнитного потока от скорости изменения внешнего магнитного поля для Nb₃Sn сверхпроводников с внутренним легированием ВД PrB₆.

Параллельно с разработкой теплостабилизированных сверхпроводников, близких по конструкции к проводам для ИТЭР, шли работы по созданию Nb-Ti проводов томографического типа с ВД. Объем производства СМ для магниторезонансной томографии соответствует потреблению порядка тысячи тонн Nb-Ti проводов в год. Использование новых проводников с повышенной устойчивостью к тепловым возмущениям может привести к снижению расходов на ввод СМ в эксплуатацию за счет сокращения тренировки.

Для разработки способа массового изготовления сверхпроводников с внутренним легированием, в качестве ВД необходимо рассматривать нетоксичные, высокоплавкие, недорогие, доступные в больших количествах материалы, чтобы впоследствии не допустить существенного удорожания производства. Выбор был остановлен на Gd₂O₃ с чистотой 99,99%, плотностью 7616 кг/м³, со средним размером частиц 10 мкм, выпускаемом отечественной промышленностью для электроники и атомной промышленности. Во ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара были изготовлены опытные куски (длиной ~ 100 м) томографического Nb-Ti провода (Ø 0,7 мм, 28 СП волокон) с ~ 2 об.% ВД Gd₂O₃ в виде четырнадцати 7-ми жильных вставок, а также аналогичный провод без ВД (рис. 20), из которых в Курчатовском институте были изготовлены 2 модельных СМ и проведены эксперименты по сравнительному определению стабильности изготовленных магнитов по аналогии с внешним легированием для двух характерных времен возмущений 1,4 и 7,4 мс. Для

анализа результатов вычислялись значения критических энергий модельных СМ из томографических проводников в сравнении с расчетным приращением энтальпии для возмущений разной продолжительности (см. рис. 20).

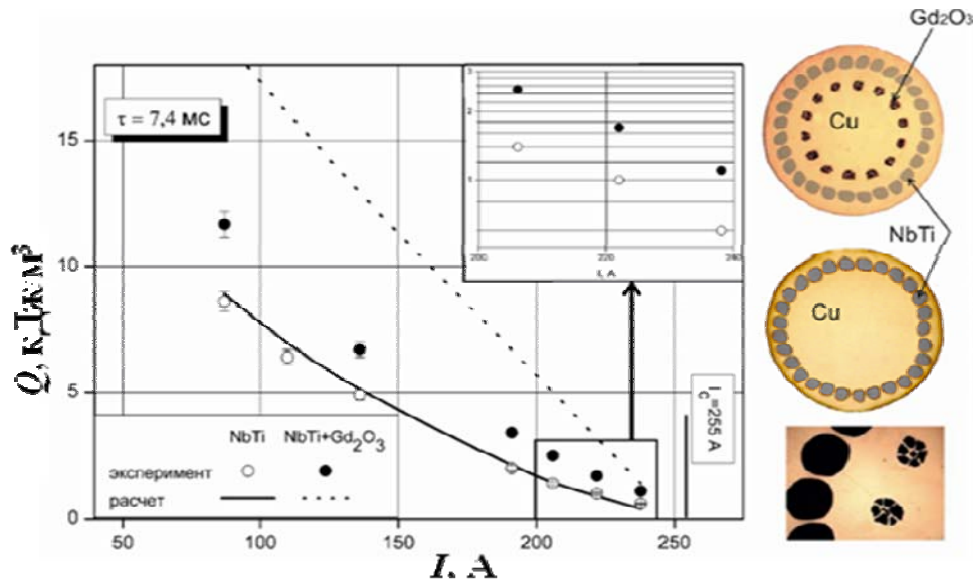


Рис. 20. Критические энергии модельных СМ с внутренним легированием ~2 об.% ВД Gd_2O_3 и без него.

Прибавка к стабильности за счет легирования ВД увеличивалась по мере приближения к критическому току и составила 23–75 % для 1,4 мс, и 36–83 % для 7,4 мс. С целью сравнения степени использования теплоемкости модельных СМ рассчитывалось отношение: $\eta = Q_{\text{эксп}}/H_{\text{расч}} \cdot 100\%$, для изготовленных по технологиям внешнего (5 об. % ВД Gd_2O_2S) и внутреннего (~1 об.% /по обмотке/ ВД Gd_2O_3) легирования при одинаковых критических запасах по температуре (рис. 21).

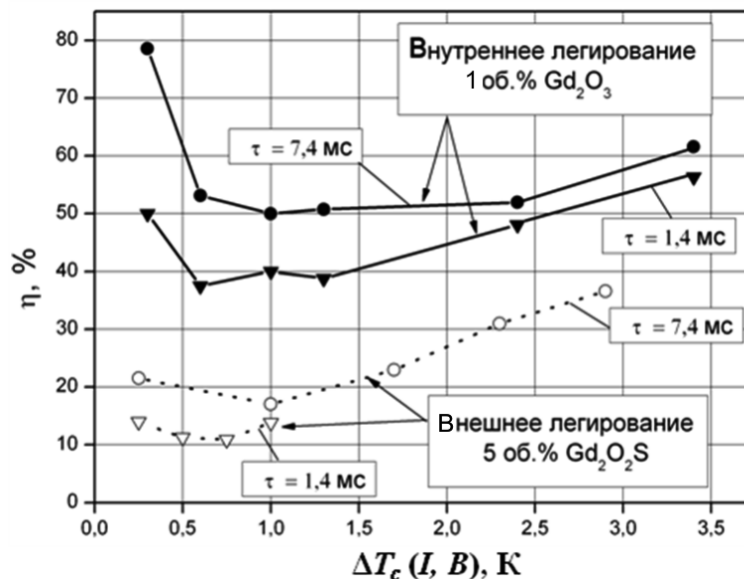


Рис. 21. Сравнение степени использования теплоемкости обмоток СМ с внешним и внутренним легированием.

Технология внутреннего легирования позволяет существенно (до 4-х раз при малых критических запасах и больших транспортных токах) повысить степень использования теплоемкости ВД по сравнению с внешним легированием, т.е. является гораздо более эффективной, несмотря на то, что объемное содержание ВД в СМ с внутренним легированием в 5 раз меньше. На рис. 22 приведено сравнение результатов опытов по определению стабильности сверхпроводников с внутренним легированием ВД с данными экспериментальной работы Д.Е. Бэйнхэма и др. (1987 г.), в которой проводились измерения устойчивости к кратковременным (0,1 мс) электромагнитным возмущениям Nb-Ti и Nb₃Sn композитных сверхпроводников в адиабатических условиях и при наличии прямого охлаждения жидким гелием всего периметра сверхпроводника.

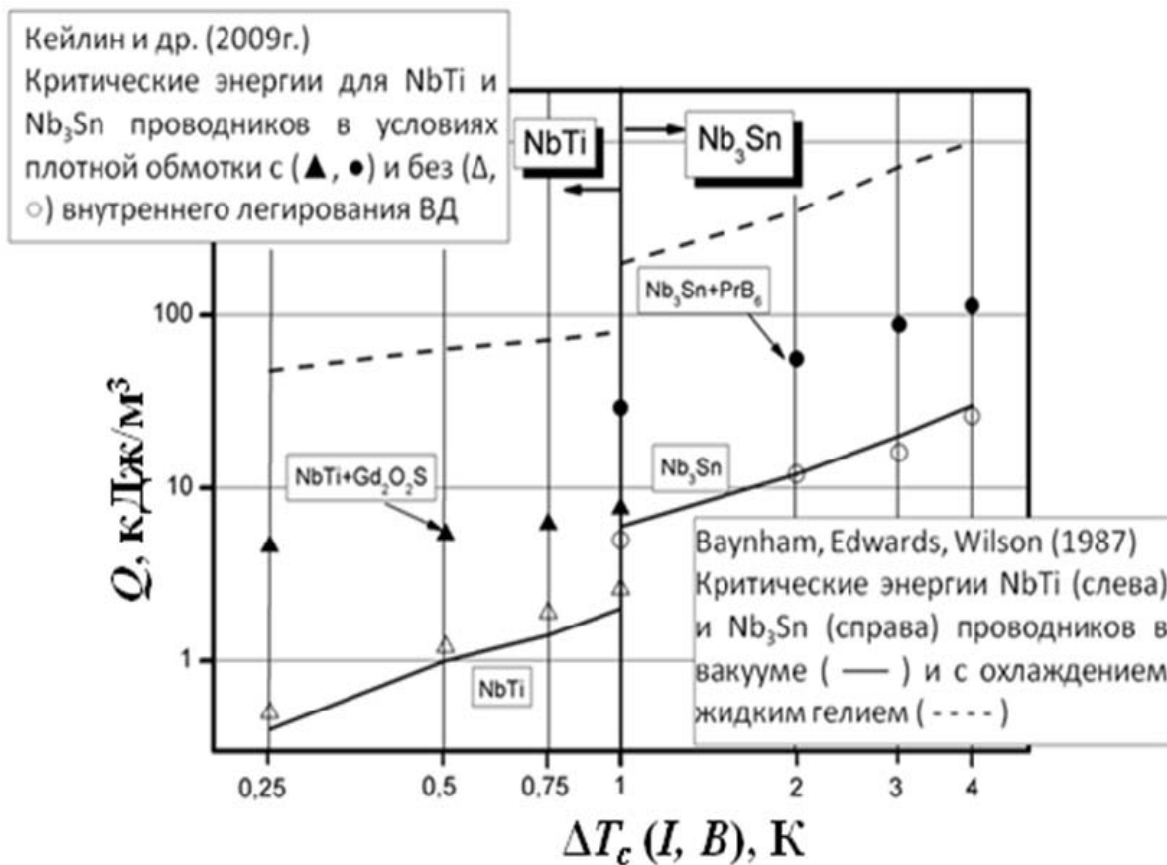


Рис. 22. Сравнение критических энергий композитных сверхпроводников с внутренним легированием ВД с данными, полученными на теплоизолированных и хорошо охлаждаемых Nb-Ti и Nb₃Sn проводах.

Прибавка к критической энергии теплоизолированных проводников за счет введения ВД оказалась заметной и на фоне непосредственного охлаждения жидким гелием. С учетом преимуществ плотных обмоток, (высокая плотность тока, а также механическая и электрическая прочность), выбор между легированием ВД и вводом в конструкцию каналов для хладагента становится, по крайней мере, дискуссионным вопросом, тем более, что в обмотках охлаждения всего периметра проводника не бывает. Например, при снижении относительного периметра охлаждения до 30 % критические энергии для сверхпроводников с ВД и охлаждаемых жидким гелием сравниваются.

В табл.1 обобщены основные результаты, полученные в ходе экспериментов по исследованию различных методов внесения ВД в состав СМ.

В табл. 1 различные экспериментальные образцы в первую очередь характеризуются способом внесения ВД в их состав (вид легирования), объемным содержанием ВД и характерным размером вида ВД (порошок, жила и др.), например, если образец – СМ, то характерный размер – это размер межвиткового компаунда.

Основными характеристиками повышения стабильности в табл. 1 являются коэффициент увеличения критических энергий возмущений по сравнению с контрольным образцом без ВД. Этот коэффициент зависит от характерного времени возмущения, которое должно быть больше времени прогрева вида ВД, тогда степень использования добавленной теплоемкости – 100 %.

Влияние ВД на термомангнитную стабильность образцов в табл. 1 характеризует увеличение поля скачка магнитного потока, соответствующая критерию «адиабатической стабильности» по сравнению с контрольным образцом.

Влияние ВД на повышение стабильности в сильно механически нагруженном СМ показывает картину тренировки, в которой важны рост тока первого и последнего перехода в нормальное состояние по сравнению с контрольным СМ без ВД (см., например, рис. 8).

Седьмая глава посвящена исследованию влияния на стабильность Nb-Ti проводников типа «кабель-в-оболочке» по разработанной автором экспериментальной методике следующих факторов:

- вида покрытия поверхности единичных проводов, составляющих скрутку кабеля, в частности, естественного оксида на медной поверхности и тонкого слоя оловянно-свинцового припоя;
- соотношения размеров и количества композитных сверхпроводящих и медных стабилизирующих проводов в скрутке.

Таблица 1. Влияние различных методов легирования высокотеплоемкими добавками на характеристики сверхпроводниковых магнитов

Вид легирования	Образец	Объемное содержание ВД, %	Характерный размер ВД, мкм	Увеличение критических энергий	Степень использования добавленной теплоемкости, %	Увеличение поля первого скачка магнитного потока, %	Картина тренировки СМ с $\sigma > 200 \text{ МПа}$
ВНЕШНЕЕ	Модельные СМ из стандартного Nb-Ti провода с добавкой ВД порошков (CeCu_6 , HoCu_2 , $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}$) с характерным размером гранул 5 – 8 мкм в эпоксидную смолу	5	500 (1/2 расстояния между витками)	до 3 раз ($\tau \approx 30 \text{ мс}$)	100	30	На 35% рост тока первого перехода в нормальное состояние и на 18% в конце тренировки
				50–80% ($\tau \approx 7 \text{ мс}$)	20–35		
				15–50% ($\tau \approx 1 \text{ мс}$)	~ 10		
ПРОМЕЖУТОЧНОЕ	Короткие образцы: стандартный Nb-Ti провод + Cu провод с 1 жилой ВД Ø 0,7 мм (CeCu_6 , HoCu_2)	20–35 (в Cu в проводе)	700	Незначительное	Незначительное	–	–
	Короткие образцы: стандартный Nb-Ti провод + Cu провод с 19 жилами ВД Ø 0,1 мм (CeCu_6 , HoCu_2 , CeAl_2 , PrB_6 , $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}$)	5–13 (в Cu в проводе)	100	до 3,5 раз ($\tau \approx 1 \text{ мс}$)	40–100	20	–
ВНУТРЕННЕЕ	Короткие образцы проводов "ИТЭРвского" типа	5 (в проводе)	70	10–80% (при $I < 0,7 I_c$) 2–4 раза (при $I > 0,7 I_c$)	55–100	10	–
				3–6 раз (при любых токах) ($\tau \approx 1 \text{ мс}$)	100	70	–
	Модельные СМ из Nb-Ti семижильных ВД вставок	1 (в проводе)	ВД вставка $\sim 50 \text{ мкм}$ ВД жила $\sim 10 \text{ мкм}$	50–80% ($\tau \approx 7 \text{ мс}$) 15–50% ($\tau \approx 1 \text{ мс}$)	50–80 40–55	–	–

Описана также авторская разработка конструкции низкоомного узла соединения (< 10 нОм) проводников КВО, стабильного в переменном режиме работы с $dB/dt = 0,3$ Тл/с.

При конструировании крупных сверхпроводниковых магнитов всегда возникает проблема соединения отдельных кусков проводника между собой. В случае высоких транспортных токов (~ 50 кА) сопротивление узла соединения (спая) должно быть менее 10^{-8} Ом. Предложена простая технология изготовления узла соединения в виде спая типа «здоровая рука» для Nb-Ti сверхпроводников КВО размерами $14,6 \times 14,8$ мм², содержащего 135 проводов $\varnothing 0,86$ мм, для первого индийского токамака «SST-I». Одной из основных черт в этой технологии является использование трех припоев с различными температурами плавления (245, 195, 145 °С). Два первых: оловянно-свинцовые, третий – с добавкой кадмия. Это необходимо для того, чтобы при каждой следующей пайке не нарушались предшествующие. Первым припоем (245 °С) заполнялось свободное пространство окончаний соединяемых кусков проводников КВО. Вторым припоем (195 °С) припаивались отводы хладагента. Третьим припоем (145 °С) спаивались сами окончания.

Из этого проводника была изготовлена замкнутая петля длиной 2,4 м со спаем длиной 0,31 м. Токи до 50 кА в петлю вводились трансформаторным способом. При изменении тока в петле от 10 до 45 кА сопротивление спая оставалось практически постоянным (от 3,6 до 4 нОм) во внешнем магнитном поле $B = 1,5$ Тл.

По росту температуры проводника в газообразном гелии при вводе тока в петлю была определена мощность электрических потерь в кабеле в собственном магнитном поле петли для разных скоростей ввода тока ($1,3 \div 1,8$ кА/с). По величине электрических потерь была произведена оценка поперечного удельного сопротивления кабеля $\sim 8 \cdot 10^{-10}$ Ом·м (отношение к поперечному сопротивлению матрицы единичного провода составила 5). Такая низкая величина свидетельствует о том, что чистые поверхности проводов плотно прилегают друг к другу в кабеле. Это может оказать негативное влияние на устойчивость КВО к импульсным магнитным возмущениям.

Целью следующего цикла исследований было сравнение стабильности шести различных сверхпроводящих Nb-Ti субкабелей, изготовленных во Всероссийском научно-исследовательском институте кабельной промышленности (ВНИИКП), чтобы сделать обоснованный выбор конструкции проводника типа КВО для обмоток тороидального магнитного поля первого китайского токамака «EAST». Все образцы состояли из одинаковых Nb-Ti сверхпроводящих проводов $\varnothing 0,87$ мм, содержащих 8910 жил сверхпроводника $\varnothing 6$ мкм, с шагом скрутки 10 мм и коэффициентом $Cu / Sc = 1,4$. Каждый кабель из множества сверхпроводящих и медных

проводов вставлялся в прямоугольную оболочку из коррозионностойкой стали. Длина каждого образца была 0,8 м. Их характеристики сведены в табл. 2. Образцы поочередно подвергались различным поперечным и продольным электромагнитным и тепловым возмущениям с характерными временами от 0,3 мс до 18 с, с $\dot{B}$ от 0,19 Тл/с до 9 Тл/с.

Реакция образцов на возмущения фиксировалась термометрами, расположенными на каждом образце или переходами в нормальное состояние. По этой реакции после каждого вида возмущений образцы выстраивались в ряд от лучшего к худшему. Такой подход к отбору образцов диктовался срочностью работы. Лучшим образцом по результатам всех испытаний оказался образец № 4, а худшими – № 1 и № 5. Характерными чертами лучшего образца № 4 являются облуженная поверхность единичных проводов и наличие анизотропии во внутренней структуре кабеля из-за разных диаметров сверхпроводящих и медных проводов, присутствующих в разных количествах. Поскольку эффективное поперечное сопротивление КВО определяется совокупностью контактных электрических сопротивлений между проводами в скрутке, которое, по-видимому, в присутствии анизотропии оказалось больше, чем в изотропной структуре.

Таблица. 2. Описание образцов субкабелей для проводника КВО первого китайского токамака «EAST».

№ образца	1	2	3	4	5	6
Количество сверхпроводников и их диаметр (мм)	20 Ø 0,87		32 Ø 0,87		32 Ø 0,87	
Количество медных проводов и их диаметр (мм)	220 Ø 0,315		32 Ø 0,98		32 Ø 0,87	
Состояние поверхности	Облужена	Первая скрутка пропаяна	«Голая»	Облужена	«Голая»	Облужена
Схема каблирования	$(1Sc + 11Cu) \times 4 \times 5$		$(2Sc + 2Cu) \times 4 \times 4$		$(2Sc + 2Sc) \times 4 \times 4$	
Шаг скручивания (мм)	32, 45, 99		50, 86, 117		50, 86, 117	
Свободное пространство для прохода He, %	42	42	43	41	44	41
Размеры, мм	$8 \times 8,2$	$8 \times 8,2$	$9,6 \times 9,8$	$9,5 \times 9,6$	$9,2 \times 9,3$	$9 \times 9,1$

Восьмая глава посвящена описанию конструкции стабильного быстродействующего сверхпроводящего трансформатора на 50 кА. Необходимость использования коротких времен заряда вторичной обмотки < 1 с и соответственно скоростей ввода тока > 50 кА/с и поля $> 0,5$ Тл/с потребовала определения уровня термоманитной стабильности проводника и измерительных прямых токонесущих участков, соединяющих вторичную обмотку с терминалами испытуемых образцов. При определяющем участии автора разработан и изготовлен сверхпроводящий трансформатор на 50 кА (испытан при скорости запитки 75 кА/с), с возможностью достижения 100 кА (расчет при скорости запитки 15 кА/с), который являлся частью большого испытательного стенда в рамках программы по созданию первого южнокорейского токамака «*Korean Star*», запущенного в эксплуатацию в конце 2009 г. На этом стенде были проведены испытания образцов сильноточных сверхпроводников типа КВО и различных конструкций узлов соединений их кусков между собой.

Сверхпроводниковый трансформатор (СТ) содержит многovitkovую (1180 витков) первичную обмотку со своим источником питания и замкнутую маловитковую (4 витка) вторичную обмотку с испытуемым образцом. Кроме того, СТ содержит основную измерительную систему тока вторичной обмотки, базирующуюся на датчиках Холла, и дублирующую – типа пояса Роговского, а также нагреватели и термометры. Характеристики первичной и вторичной катушек сведены в табл. 3. Коэффициент трансформатора составляет 130, поэтому чтобы получить ток в образце 50 кА, необходимо быстро разрядить (~ 1 с) первичную обмотку с током 383 А. При таком разряде – заряде общие вихревые потери во вторичной обмотке составляют ~ 21 Дж, что приводит к ее нагреву на 0,7 К.

Таблица 3. Характеристики первичной / вторичной обмоток сверхпроводникового трансформатора на 50 кА.

Параметр	Величина
Внутренний диаметр	445 мм/576 мм
Внешний диаметр	525 мм/600 мм
Высота	547 мм/547 мм
Число слоев	10/1
Число витков	1180/4
Индуктивность	0,4 Гн/677мкГн
Критический ток	1 кА/166 кА
Максимальное поле при критическом токе	2,2 Тл/ 1,3 Тл
Взаимная индуктивность	1,29 мГн

Первое ограничение на достигаемый ток во вторичной обмотке устанавливает ее же критический ток с учетом собственного магнитного поля 1,3 Тл – 166 кА. Второе ограничение устанавливает критический ток первичной обмотки – 130 кА. Третье ограничение устанавливает уровень терромагнитной стабильности прямых измерительных участков проводника при быстрых изменениях тока и собственного поля.

Ограничения тока по первичной и вторичной обмоткам, рабочая и достигнутая точки, а также расчетная зависимость терромагнитной стабильности измерительного участка представлены на рис. 23.

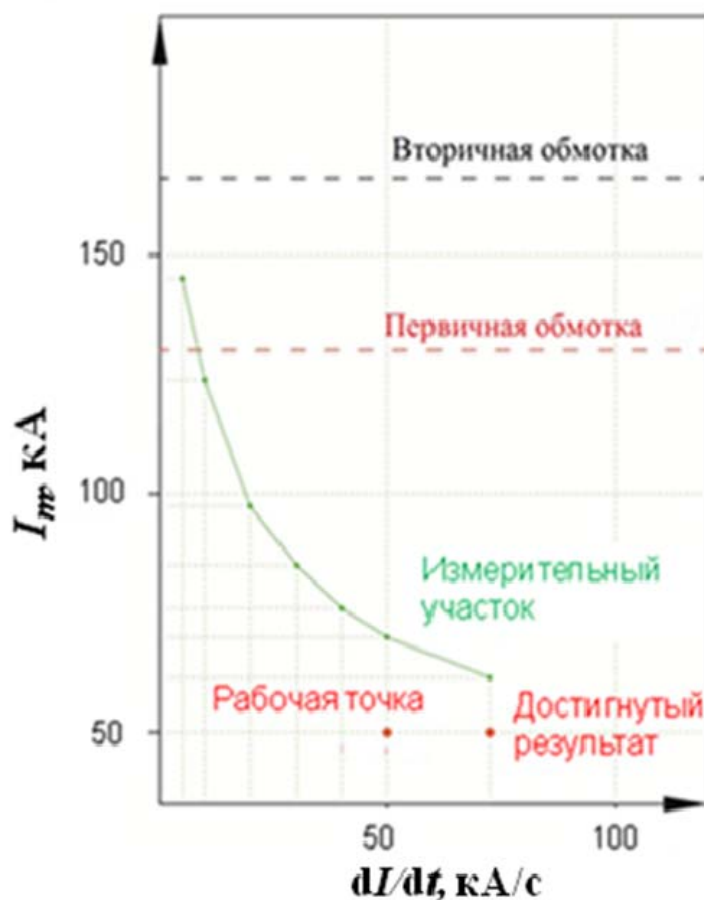


Рис. 23. Зависимость достигаемого тока во вторичной обмотке от скорости ввода тока.

Из рисунка видно, что в установку заложены большие возможности, и при должном снижении скорости ввода тока можно существенно повысить ток во вторичной обмотке, например, при снижении скорости до 10 кА/с с запасом получить ток 100 кА.

Основные выводы.

1. Разработана методика исследования стабильности композитного сверхпроводника с помощью специально созданной конструкции сверхпроводникового магнита – геликоида с плоскими витками, каждый из которых состоит из множества параллельных механически и гальванически соединенных композитных сверхпроводников на основе Nb-Ti и Nb₃Sn, и фактически является массивным сверхпроводником.
2. При помощи датчиков Холла и нагревателей, размещенных в центральной части геликоида, обнаружена аномально сильная зависимость криостатической стабильности геликоида от динамики магнитного потока – перераспределения тока и поля в поперечном сечении. Также обнаружено уникальное явление обратной динамики магнитного потока – восстановление первоначального распределения тока и поля после ограниченного скачка магнитного потока на тепловой неоднородности (~ 4% по объему) геликоида при охлаждении его сверхтекучим гелием при $T = 2,13$ К. Впервые с использованием сверхпроводящего геликоида экспериментально проверена теория терромагнитной стабильности охлаждаемых композитных сверхпроводников без применения подгоночных параметров.
3. С применением двух принципиально различных экспериментальных методик, (короткий образец с импульсным нагревателем и сильно механически нагруженная модельная однослойная обмотка с $\sigma \sim 400$ МПа со спектром естественных механотермических возмущений) обнаружено и объяснено практическое отсутствие влияния охлаждения He-II по сравнению с He-I на криостатическую стабильность в наиболее востребованной для практики области транспортных токов, близких к критическому ($i = I/I_c = 0,7 \div 0,9$).
4. Выполнен анализ электродинамического поведения конструкций Nb-Ti сверхпроводников типа «кабель-в-оболочке» с разным покрытием одиночных проводов при различных электромагнитных возмущениях, и впервые в них обнаружены скачки магнитного потока в изменяющемся магнитном поле при нулевом транспортном токе. Сконструирован простой в изготовлении, низкоомный и стабильный в переменном режиме узел соединения кусков сверхпроводников типа «кабель-в-оболочке».
5. Создан и успешно испытан стабильный и быстродействующий сверхпроводниковый трансформатор постоянного тока с $I = 50$ кА и $dI/dt = 75$ кА/с.
6. Разработаны и экспериментально обоснованы принципиально новые методы повышения стабильности низкотемпературных сверхпроводниковых магнитов либо за счет внесения в их состав нескольких объемных процентов веществ с ано-

мально высокими теплоемкостями, либо посредством легирования их проводников этими веществами. По эффективности эти методы сравнимы с непосредственным охлаждением проводника жидким гелием.

7. Основным научным результатом является разработка усовершенствованной энтальпийной стабилизации сверхпроводниковых магнитов с помощью высокотеплоемких добавок и создание нового класса низкотемпературных композитных сверхпроводников – теплостабилизированных, у которых примерно на порядок выше объемная теплоемкость по сравнению с обычными композитными сверхпроводниками (приоритет подтвержден четырьмя патентами РФ).

Основные публикации по теме диссертации.

1. Keilin V.E., Kovalev I.A., Kruglov S.L., Pavin D.B. Superconductor stability against heat pulses in saturated and pressurized superfluid helium. – *Cryogenics*, 1980, No. 12, p. 694–696.
2. Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л. Тренировка и деградация модельной сверхпроводящей обмотки в зависимости от условий охлаждения/ Препринт ИАЭ-3509/10. – М.: ИАЭ им. Курчатова, 1981.– 8 с.
3. Keilin V.E., Kovalev I.A., Kruglov S.L. Training and degradation of a model superconducting winding depending on cooling conditions and conductor cross-section. – *Cryogenics*, 1985, v.15, No. 5, p. 257–260.
4. Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л., Павин Д.Б. Сверхпроводящий геликоид – альтернатива обычным сверхпроводящим обмоткам. – *ДАН СССР*, 1988, т. 303, № 6, с. 1366–1370.
5. Keilin V.E., Kovalev I.A., Kruglov S.L., Pavin D.B. Study of superconducting helicoid stability. – *Proc. of the Twelfth Int. Cryog. Eng. Conference. Southampton UK*, 12–15 July, 1988, p. 845–851.
6. Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л., Павин Д.Б. Исследование стабильности и электрических потерь в сверхпроводящем геликоиде/Препринт ИАЭ 4881/10. – М. ИАЭ им. Курчатова, 1989.– 47стр.
7. Круглов С.Л. Влияние секционирования на динамическую стабильность и электрические потери в сверхпроводящих геликоидах / Препринт ИАЭ-4971/10. – М.: ИАЭ им. Курчатова, 1989.– 12 стр.
8. Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л., Павин Д.Б., Разживин Н.В. Изобретение. Способ изготовления сверхпроводящей обмотки и устройство для его осуществления. – *А.с. СССР № 1325587*. 1987.
9. Keilin V.E., Kovalev I.A., Kopeikin N.F., Kruglov S.L., Pavin D.B. An approach to the concept of large size and complex geometry superconducting helicoids. – *JCEC* 13

Proceedings. Cryogenics, 1990, vol. 30, September Supplement, p. 620—624.

10. Keilin V.E., Kovalev I.A., Kopeikin N.F., Kruglov S.L., Pavin D.B. Investigation and development of superconductivity helicoids. – IEEE Trans. on MAG.- 27. No.2, March 1991, p. 2284–2287.

11. Keilin V.E., Kovalev I.A., Kopeikin N.F., Kruglov S.L., Pavin D.B. Plane — Turns Superconducting Magnets: Option for Fusion. – Journal of Fusion Energy, V.11, 1992, No. 2, p. 1–6.

12. Круглов С.Л., Романовский В.Р. Динамическая устойчивость сверхпроводящего состояния магнитной системы геликоидального типа. – Письма в ЖТФ, 1994, т. 20, вып. 22, с. 89–94.

13. Ковалев И.А., Круглов С.Л. Экспериментальное исследование электрофизических особенностей сверхпроводящего геликоида. – ЖТФ, 1995, т. 65, № 11, с. 150–158.

14. Круглов С.Л. Исследование потерь на намагничивание в сверхпроводящем геликоиде. – ЖТФ, 1997, т. 67, № 2, с. 108–112.

15. Dudarev A. A., Keilin V.E., Kruglov S.L., Nikolaev A.A., Shcherbakov V.I., Saxena Y.C., Pradhan S. Testing of a Low-Resistance Joint of CICC for Indian Tokamak SST-1. – IEEE Trans. on Applied Superconductivity, v. 10, No. 1, March 2000, p. 836–839.

16. Baang S., Keilin V.E., Kovalev I.A., Surin M.I., Sytnicov V.E., Kruglov S.L. et al. – The conductors of the 50kA superconducting transformer for SSTF (Samsung Superconductor Test Facility). – Physica C, v. 354, 2001, p. 105–109.

17. Baang S., Keilin V.E., Kovalev I.A., Surin M.I., Sytnicov V.E., Kruglov S.L. et al. The superconducting Transformer of the Samsung Superconductor Test Facility (SSTF). – IEEE Trans. On Appl. Supercond. v. 11, No. 1, March 2001, p. 1494–1497.

18. Anashkin O.P., Ivanov D.P., Keilin V.E., Kopeikin N.F., Kovalev I.A., Kruglov S.L., Krivvykh A.V., Lysenko V.V., Novikov S.I., Patrikeev V.M., Pradhan S., Saxena Y.C., Stepanov V.V., Shcherbakov V.I., Shugaev I.O. – The results of the Model coil tests for the cable-in-conduit conductor for SST-1 Tokamak. – IEEE Trans. On Appl. Supercond. v. 12, No. 1, March 2002, p. 567–570.

19. Круглов С.Л., Щербаков В.И. Динамика скачка магнитного потока в композитном сверхпроводнике. – ЖТФ, 2002, т. 72, вып. 11, с. 121–124.

20. Алексеев П.А., Лазуков В.Н., Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л., Садиков И.П. Способ изготовления сверхпроводящих обмоток. – Патент РФ № 2254633. 2003.

21. Акимов И.И., Алексеев П.А., Ведерников А.П., Воробьева А.Е., Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л., Лазуков В.Н., Садиков И.П., Салунин Н.И., Шиков А.К. Комбинированный сверхпроводник (варианты). – Патент РФ № 2273906. 2004.

22. Алексеев П.А., Боев А.И., Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л. Лазуков

В.Н., Садилов И.П. Экспериментальное обнаружение значительного увеличения стабильности сверхпроводящих обмоток с добавками веществ, обладающих экспериментально высокой теплоемкостью/ Препринт ИАЭ – 6309 /10. – М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2004. – 11 с.

23. Алексеев П.А., Боев А.И., Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л., Козуб С.С., Костров Е.А., Лазуков В.Н., Садилов И.П. Исследование влияния добавок редкоземельных интерметаллидов с экстремально высокой теплоемкостью состав сильно механически нагруженных овальных обмоток на достигаемые параметры / Препринт ИАЭ – 6334 /10.– М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2004, 8 с.

24. Alekseev P.A., Boev A.I., Kovalev I.A., Keilin V.E., Kruglov S.L., Lazukov V.N., Sadikov I.P. Experimental evidence of considerable stability increase in superconducting windings with extremely high specific heat substances. – Cryogenics, 2004, v. 44, p. 763–766.

25. Alekseev P.A., Boev A.I., Kovalev I.A., Keilin V.E., Lazukov V.N., Sadikov I.P., Kruglov S.L. Considerable stability increase in superconducting windings doped with extremely high specific heat substances. – IEEE Trans. on Appl. Supercond, v. 15, No 2, June 2005, p.1629–1632.

26. Alekseev P.A., Boev A.I., Keilin V.E., Kovalev I.A., Kozub S.S., Kostrov E.A., Kruglov S.L., Lazukov V.N., Sadikov I.P., Shutova D.I. Influence of heat capacity substances doping on quench currents of fast ramped superconducting oval windings. – Cryogenics, 2006, v. 46, p. 252–255.

27. Akimov I.I., Alekseev P.A., Keilin V.E., Kovalev I.A., Kruglov S.L., Kostrov E.A., Lazukov V.N., Medvedev M.I., Sadikov I.P., Shikov A.K., Shutova D.I. Stability increase of NbTi conductors with additions of extremely large specific heat substances. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity Conference, 2006, Vol. 16, No 2, p. 1172–1175.

28. Костров Е.А., Круглов С.Л., Шутова Д.И. Обнаружение значительного увеличения стабильности комбинированных сверхпроводников с добавками веществ, обладающих экстремально высокой теплоемкостью/ Препринт ИАЭ-6427/10.– М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2006. – 22 с.

29. Alekseev P.A., Keilin V.E., Kovalev I.A., Kruglov S.L., Lazukov V.N., Medvedev M.I., Shutova D.I. Investigation of considerable stability increase of composite superconductors doped with extremely large heat capacity substances. – Superconductor Science and Technology, 2007, v. 20, p. 71–76.

30. Алексеев П.А., Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л., и др. Обнаружение значительного увеличения стабильности комбинированных сверхпроводников с добавками веществ с чрезвычайно высокой теплоемкостью при низких температурах. – ЖТФ, 2007, т. 77, вып. 9, с. 48–53.

31. Keilin V.E., Kovalev I.A., Kruglov S.L., Shutova D.I. The influence of thermal disturbance duration on the stability of superconducting windings with extremely large heat capacity substances. – *Superconductor Science and Technology*, 2008, v. 22, No 2, 21025018.
32. Алексеев П.А., Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л., Лазуков В.Н., Воробьева А.Е., Медведев М.И., Потанина Л.В., Салунин Н.И., Шиков А.К. Теплостабилизированный сверхпроводник. – Патент РФ №2334296. 2008.
33. Keilin V.E., Kovalev I.A., Kruglov S.L., Vorobjeva A.E., Medvedev M.I., Shikov A.K., Shutova D.I. Considerable stability increase of Nb₃Sn multifilamentary wire internally doped with a large heat capacity substance (PrB₆). – *Superconductor Science and Technology*, 2009, v. 22, No 8, 085007.
34. Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л., Щербаков В.И., Шутова Д.И. Обнаружение значительного увеличения термомангнитной стабильности у многожильных сверхпроводников с внутренним легированием высокотеплоемкими добавками. – *ЖТФ*, 2010, т. 80, вып. 2, с. 155–158.
35. Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л., Шутова Д.И. Влияние легирования сверхпроводящих соленоидов высокотеплоемкими добавками на стабильность в динамических режимах. – *ЖТФ*, 2010, т. 80, вып. 3, с. 115–117.
36. Воробьева А.Е., Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л., Медведев М.И., Потанина Л.В., Салунин Н.И., Шиков А.К., Шутова Д.И. Исследование увеличения стабильности композитного NbTi сверхпроводника с добавкой высокотеплоемкого соединения Gd₂O₂S. – *ЖТФ*, 2010, т. 80, вып. 10, с. 70–73.
37. Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л., Шиков А.К., Шутова Д.И., Воробьева А.Е., Медведев М.И., Потанина Л.В., Салунин Н.И. Использование высокотеплоемких добавок для повышения стабильности сверхпроводящих магнитов (обзор экспериментальных результатов)/ Препринт ИАЭ-6635/10.–М.: РНЦ «Курчатовский институт» 2010. – 14 с.
38. Шиков А.К., Воробьева А.Е., Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л. и др.– Теплостабилизированный сверхпроводник на основе соединения Nb₃Sn (варианты) и способ его изготовления (варианты).– Патент РФ № 2378728, 2010.
39. Кейлин В.Е., Ковалев И.А., Круглов С.Л., и др. Разработка и исследование сверхпроводящих проводов и обмоток с добавками высокотеплоемких порошков.– Сборник трудов 4й всероссийской конференции по наноматериалам «Нано-2011», секция 5 – Нанокompозиты, с.529.
40. Keilin V.E., Kovalev I.A., Kruglov S.L., Shikov A.K., Shutova D.I., Vorobjeva A.E., Medvedev M.I., Potanina L.V., Salunin N.I. Utilization of large heat capacity substances for improving the stability of superconducting magnets.– *Cryogenics*, 2011, v. 51, p. 359–365.