

На правах рукописи



НОВИКОВ Михаил Станиславович

**РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ
ТОКОНЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ВТСП ЛЕНТ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ**

01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2015

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт»

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

КЕЙЛИН
Виктор Ефимович

– доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт», г. Москва

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ВЫСОЦКИЙ
Виталий Сергеевич

– доктор технических наук

ФИШЕР
Леонид Михайлович

– доктор физико-математических наук, профессор

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ

– АО «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова»

Защита диссертации состоится « 16 » декабря 2015 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета ДМ 002.262.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН при участии Объединенного института высоких температур РАН по адресу: г. Москва, ул. Ижорская, 13, экспозал ОИВТ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института высоких температур РАН.

Автореферат разослан: « 6 » ноября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук



Кугель Климент Ильич

Актуальность темы диссертации

Работа посвящена разработке, изготовлению и исследованию сильноточных токонесущих элементов (ТНЭ) из ВТСП лент 2-го поколения с целью создания сильноточных сверхпроводниковых устройств.

Для любого ВТСП устройства с рабочим током, превышающим максимальный ток ВТСП ленты, необходим сильноточный ТНЭ.

Основные задачи: разработка, изготовление и исследования сильноточных ТНЭ для магнитных систем и электроэнергетических устройств. Работа поддерживалась в рамках проектов, финансируемых ГК «Росатом»: разработка сверхпроводникового ограничителя тока (СОТ) резистивного типа; разработка гибких токоподводов для ускорительных магнитов и устройств термоядерной энергетики; разработка ТНЭ для прототипа сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии (СПИН) мегаджоульного класса.

Рассмотрены возможности применения гибкого геликоидального ТНЭ в таких устройствах, как: магнитные системы токамаков; системы для космического применения (плазменный двигатель, магнитная экранировка); импульсные магниты; магнитные системы ускорителей частиц (высокополевые вставки, гибкие токоподводы); электромшины; токоограничители индуктивного типа.

При разработке ТНЭ для этих устройств должны учитываться токонесущая способность, диссипация энергии в переменных режимах, допустимый радиус изгиба, механическая устойчивость, тепловая стабильность. Комплексные исследования всех этих факторов весьма актуальны.

Цели и задачи диссертации

Разработка и изготовление прототипов токонесущего элемента СОТ из многих параллельных лент, исследование его параметров в рабочих условиях и выработка рекомендаций к применению.

Разработка конструкции гибкого сильноточного ТНЭ малого диаметра из ВТСП-2 лент, намотанных геликоидально многими параллельными лентами в несколько слоев на гибкие формеры. Изготовление и комплексные исследования образцов ТНЭ. Разработка технологии и создание экспериментальной универсальной установки для изготовления ТНЭ и устройств из него. Выработка рекомендаций к применению различных конструкций гибкого ТНЭ в магнитных системах и электроэнергетических устройствах.

Научная новизна

1. Разработаны конструкции, изготовлены и исследованы образцы ТНЭ.
2. Созданы экспериментальные устройства для изготовления ТНЭ.
3. Разработана технология изготовления сильноточных ТНЭ
4. Сформулированы рекомендации по изготовлению устройств из сильноточных ТНЭ.

Достоверность полученных результатов: Получена достаточно хорошая повторяемость экспериментальных результатов и совпадение результатов исследований ТНЭ и единичных ВТСП лент. Экспериментальные данные подтверждают результаты анализа и расчетов. Методики расчета тепловых процессов достигают удовлетворительной для практических целей точности при моделировании экспериментов. Применены апробированные методики экспериментального исследования ТНЭ и единичных лент, численных и аналитических расчетов.

Практическая ценность

Применение разработанных конструкций ТНЭ и автоматизированных устройств для изготовления ТНЭ позволит создать высокоточные ВТСП-2 устройства различных классов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка и исследования токонесущих элементов СОР из 2, 3 и 6 параллельных лент.
2. Разработка и изготовление экспериментального устройства для намотки элементов СОР, разработка конструкций токовых терминалов и способа защиты ВТСП лент в ТНЭ от перегорания.
3. Разработка, изготовление и исследование прототипов токоограничивающих элементов и токоограничителей – модулей на 380В 250А действующего значения из 2 лент, 8-ми модульного СОР на 3,5 кВ 250А, а также моделей токоограничивающих элементов на коаксиальных цилиндрах.
4. Разработка конструкций, изготовление и исследование образцов гибкого высокоточного геликоидального ТНЭ из ВТСП-2 лент с многоволоконными стальными и полыми медными формерами.
5. Выработка рекомендаций к применению геликоидального ТНЭ в магнитах термоядерного источника нейтронов, плазменных электрореактивных двигателей, в импульсной магнитной системе и гибких токоподводах с проточным охлаждением.
6. Разработка, изготовление, полномасштабные испытания экспериментального устройства для изготовления длинномерных кусков геликоидального ТНЭ, и разработка способа изготовления такого ТНЭ.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях, перечисленных ниже:

- «European Conference on Applied Superconductivity» EUCAS-2011, 18-23 сентября 2011 г., Гаага, Нидерланды
- «Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости» НКПС-2011, 6-8 декабря 2011 г. Москва
- семинары НИЦ «КИ» по прикладной сверхпроводимости,
- рабочее совещание «Технология ВТСП-2 проводников и их применение в устройствах электроэнергетики», 23-24 мая 2012 г, Москва.
- «Applied Superconductivity Conference» ASC2012, 7-12 октября 2012 г., Портленд, Орегон, США
- «Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости» НКПС-2013 26–28 ноября 2013 г. Москва
- «Материалы ядерной техники» МАЯТ2014, 7-9 октября 2014 г. Звенигород
- научно-практическая конференция “Технология ВТСП-2 проводников и их применение в устройствах электроэнергетики”, г. Москва, 30-31 октября 2014 г.
- XII Всероссийская научно-техническая конференция «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского», г. Москва 16-17 апреля 2015 г.

Публикации: результаты разработок и исследований, изложенных в диссертации, опубликованы в 10 работах, 6 из которых – в рецензируемых изданиях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, литературного обзора, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 181 страница, включая 98 рисунков, 21 таблицу и список литературы из 59 наименований.

Содержание работы

Во введении и главе 1 (литературном обзоре) обоснована актуальность темы, сформулированы цели исследования, научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Описаны современные ВТСП провода 2 поколения (SuperPower, SuNAM, THEVA), основные их характеристики, методики исследования. Описаны способы получения высоких рабочих токов в ВТСП устройствах – параллельная намотка, намотка стопкой лент, ребель – полностью транспонированный ТНЭ из стрэндов сложной формы, вырезанных из широких ВТСП лент, твистированная стопка лент, геликоидальный элемент – аналогичный CORCC (Conductor on Round Core Cable). Проведено сравнение разных конструкций ТНЭ между собой. Рассмотрен вопрос дальнейшего агрегатирования базовых ТНЭ.

Обоснован выбор конструкций изготавливаемых и исследуемых ТНЭ (геликоидальный ТНЭ для импульсных магнитов и гибких кабелей, параллельная и параллельно-стековая намотка для резистивных COT).

Рассмотрены работы по перспективному применению сильноточных токонесущих элементов для токамаков и ускорителей частиц.

Проанализированы перспективы применения CORCC в качестве компактных гибких силовых кабелей и работы, ведущиеся в этом направлении.

Рассмотрены некоторые классы перспективных магнитных систем и устройств из ВТСП, в которых могут быть использованы сильноточные токонесущие элементы, например, системы космического применения.

Глава 2 посвящена разработке ТНЭ для сверхпроводниковых ограничителей тока (COT) резистивного типа и прототипа COT на их основе.

В разделах 1 и 2 главы 2 описаны постановка задач и анализ проблем, возникающих при разработке резистивных COT из ВТСП лент 2-го поколения.

Задача для COT резистивного типа – ограничение токов коротких замыканий в распределительных электросетях. Необходимо решить следующие вопросы:

- создание сильноточных ТНЭ и обеспечение равномерного распределения токов между несколькими ВТСП лентами;
- проблема «горячих пятен» – не распространяющихся резистивных участков, и защита ТНЭ при КЗ и перегрузке;
- влияние поля собственного тока устройства на токонесущую способность ТНЭ;
- недопущение перегрева ВТСП лент при срабатывании COT;
- обеспечение достаточно малого времени восстановления (эффективное охлаждение, своевременное отключение, подбор оптимальной длины ВТСП ТНЭ);
- допустимый уровень транспортных потерь на переменном токе в сверхпроводящих частях и резистивных терминалах.

В разделах 3, 4 и 5 главы 2 описаны исследования ТНЭ и ВТСП лент для резистивных COT и методика защиты ТНЭ COT от сгорания при КЗ. Исследованы:

1. Зависимости сопротивления от температуры для различных ВТСП лент.
2. Вольтамперные характеристики (ВАХ) лент SuperPower SF12100 на постоянном и переменном токе в поле собственного тока, транспортные потери, анизотропия во внешних полях с амплитудой порядка максимального собственного поля COT.

3. Скорость распространения резистивной зоны лент SuperPower SF12100 и проблема «горячих пятен», эти эксперименты численно промоделированы. Результаты расчетов температуры и потенциалов на ВТСП лентах удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными, что позволяет применить данную методику для расчета любого режима работы СОТ. Скорость распространения резистивной фазы составляет всего 0,05-0,1 м/с, что создает опасность перегорания ВТСП лент в режиме КЗ. Поэтому предложено защищать ВТСП ленты шунтированием их резистивной фольгой, которая принимает на себя часть выделяющейся энергии. В выбранной для экспериментальных устройств металлической ленте нанесенный с каждой стороны микронный слой меди защищает ВТСП ленту. Защитная лента (одна на 2, 3 или 6 ВТСП лент) незначительно увеличивает длину проводника токоограничивающего элемента. По результатам исследований ВТСП лент для СОТ выбрана ВТСП лента SF12100 со 100 микронной подложкой из хаstellоя.

В разделе 6 и 7 главы 2 представлен расчет необходимой для ограничения тока длины токонесущего элемента в зависимости от времени отключения и допустимой температуры, описана конструкция модулей СОТ на 250 А 380 В.

Численная модель, по которой проводился расчет, представляет собой систему уравнений теплового баланса в ТНЭ и баланса напряжений в цепи с СОТ. Методика позволяет учитывать при расчетах характеристики электросети в рабочем состоянии и при КЗ, охлаждение ТНЭ в СОТ, ВАХ и теплоемкость ВТСП лент и другие параметры СОТ.

На основе технических требований и исследований ВТСП лент, а также вышеприведенных расчетов разработана конструкция модулей 250 А (Рисунок 1 а). Токоограничивающий элемент состоит из 2-х параллельных ВТСП лент SuperPower SF12100, резистивной ленты и каптоновой (полиимидной) ленты. Первая ВТСП лента наматывается сверхпроводящим слоем вверх, поверх нее резистивная лента, затем вторая ВТСП лента сверхпроводящим слоем вниз и сверху каптоновая изоляция. Затем такой же элемент наматывается поверх внутреннего, ток течет встречно для уменьшения поля собственного тока устройства. Для лучшего охлаждения в каркасе имеются отверстия.

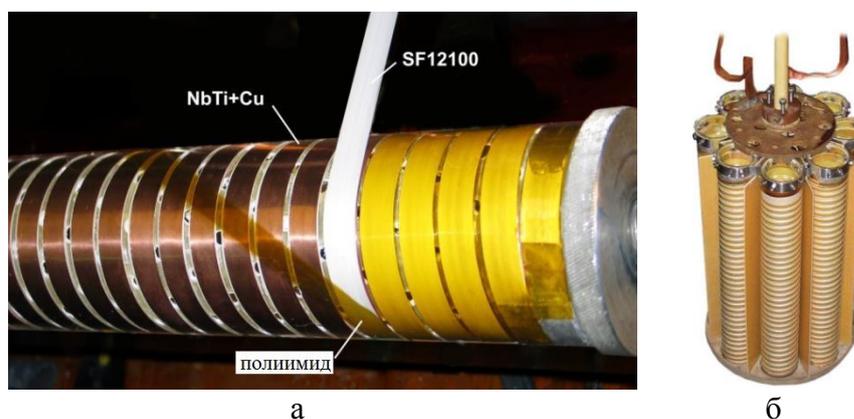


Рисунок 1. Конструкция модулей СОТ на 250 А 380 В (а) и 8 модульного СОТ на 3,5 кВ (б)

Модули изготовлены на экспериментальном намоточном устройстве для создания обмоток из нескольких параллельных ВТСП лент. Отдающая часть устройства представляет собой платформу, перемещающуюся линейно синхронно с вращением приемного вала с установленным на нем каркасом модуля СОТ, параллельно приемному валу. На отдающей части установлены 4 двигателя постоянного тока с бобинами для независимого регулируемого стабилизированного натяга всех наматываемых лент.

В разделе 8 главы 2 описаны испытания модулей и прототипа СОТ из 8 модулей.

Испытания модулей 250 А проведены на номинальном токе и в режиме КЗ и показали соответствие модулей техническим требованиям по токонесущей способности, глубине токоограничения и времени восстановления (< 5 секунд).

Прототип резистивного СОТ на 250 А 3,5 кВ состоит из 8 модулей, соединенных последовательно (Рисунок 1 б). Испытания прототипа СОТ на 250 А 3,5 кВ производились при номинальном токе и в режиме имитации короткого замыкания при разряде конденсаторной батареи, заряженной до 5 кВ. Испытания показали токонесущую способность и глубину токоограничения СОТ, соответствующую техническим требованиям. Этот эксперимент численно промоделирован для подтверждения расчетной методики, и результаты расчетов удовлетворительно совпали с экспериментальными данными.

Сделаны следующие выводы: для решения проблемы «горячих пятен» предложено использование защитного покрытия (или дополнительной ленты) из резистивного материала для уменьшения локального нагрева. Желательно применение защитного отключения при перегрузке током выше номинального. Создано экспериментальное автоматизированное намоточное устройство для изготовления модулей СОТ диаметром до 900 мм с числом параллельных лент до 6. Изготовленные модули СОТ на 250 А 380 В и макет СОТ из 8 модулей на 3,5 кВ являются работоспособными конструкциями для исследования применения резистивных СОТ в распределительных сетях.

В главе 3 описаны разработка и исследование ТНЭ для проектируемого прототипа СОТ на 900 А 27,5 кВ. **В разделе 1** приведена схема такого СОТ (Рисунок 2 а) может представлять собой 10 пар (встречно включенных) коаксиальных катушек из токонесущего элемента, состоящего из 6 ВТСП лент, намотанных в 2 слоя, между которыми находится резистивная защитная лента. Встречные ТНЭ находятся на разных каркасах, что может существенно уменьшить время восстановления после КЗ из-за равномерного охлаждения.

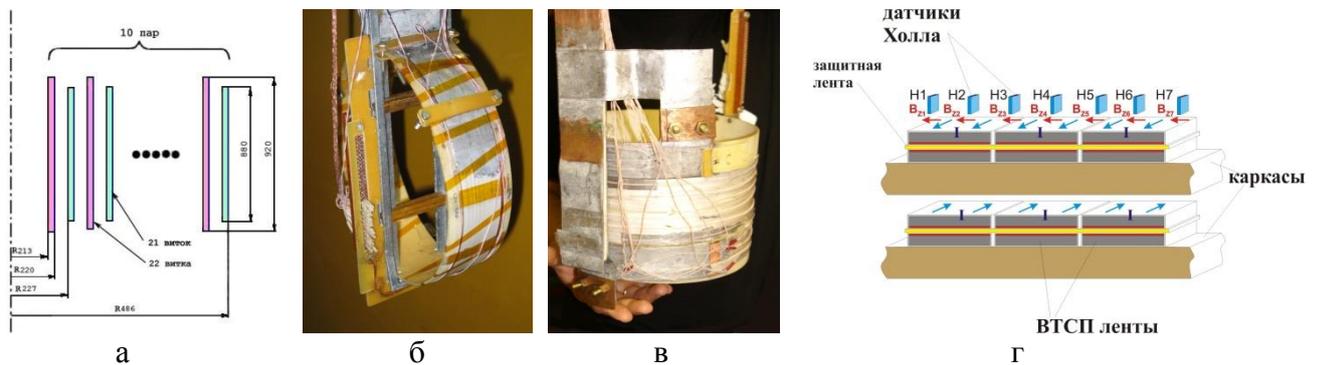


Рисунок 2. Конструкция прототипа СОТ на 900 А 27,5 кВ (а); Модельный образец ТНЭ из 6 лент (б); Модельный образец ТНЭ из 3 лент для исследования влияние краевых эффектов собственного поля (в); Схема ТНЭ и расположения датчиков Холла (г)

В разделе 2 главы 3 описаны создание и исследование образцов токонесущего элемента для прототипа СОТ на 900 А 27,5 кВ. Конструкция ТНЭ и расположение датчиков Холла показаны на Рисунке 2 г, модельные образцы – на Рисунке 2 б и в. Образцы намотаны на оправки диаметром около 200 мм и состоят из одного или двух слоев из 3 или 6 параллельно соединенных ВТСП лент. Многоленточные ТНЭ вначале испытаны на постоянном и переменном токе отдельно. Затем они были коаксиально смонтированы и встречно включены, чтобы уменьшить собственное поле и индуктивность. Поведение токов в лентах исследовано по данным массива датчиков Холла и ВАХ нескольких лент. Общий ток токонесущего элемента близок к сумме токов отдельных лент (около 750А для 3 и 1350А для 6 лент). Токонесущая способность на постоянном токе 1-виткового макета с 6 лентами около 1250А на 10 мкВ/см и 1350А на 100 мкВ/см. На 900 А действующего значения тока макет работал стабильно, при

1000 А произошел тепловой переход. Токонесущая способность на постоянном токе 3-х витковой модели с 3 лентами около 750А на 10 мкВ/см.

В разделе 3 главы 3 описаны влияние собственного поля на крайних лентах крайних витков и шунтирование этих лент дополнительной ВТСП лентой. Проведенные расчеты распределения поля показали наличие пиков перпендикулярной составляющей магнитного поля на краях обмоток. Это может приводить к снижению тока всего устройства, значительному увеличению потерь. Предложено шунтировать крайние ленты крайних витков дополнительными ВТСП лентами. Шунтирование крайних лент крайних витков дополнительными лентами позволило поднять действующее значение токонесущей способности всей конструкции с 450А до 550А для 3 параллельных лент (Рисунок 3 б). Зеленая вертикальная линия показывает номинальный ток ТНЭ из трех лент. Верхняя оценка потерь на устройство на номинальном токе (900А) составляет всего 40 Вт, на пиковом токе 1120А – 200 Вт, что сравнимо с тепловыделениями в медных соединениях и теплопритоками по тоководам. Средние потери много меньше, т.к. средний ток равен всего 250А. Таким образом, роль потерь на переменном токе в ВТСП в данном проекте незначительна.

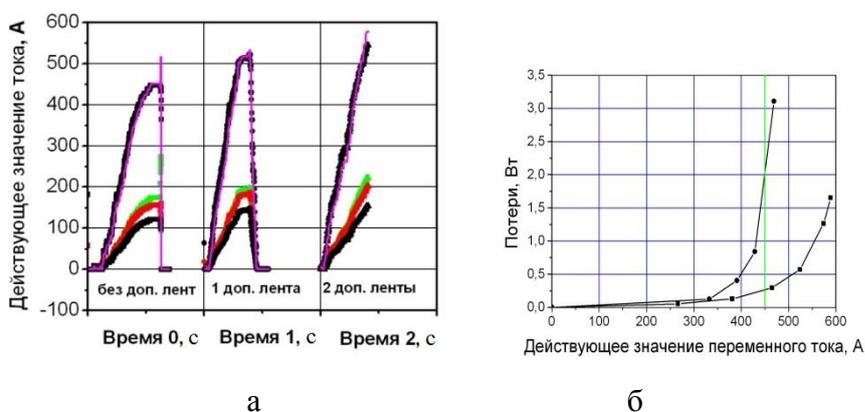


Рисунок 3. Общий ток и токи лент от времени в 3-витковом макете без дополнительных лент, с дополнительной лентой на ленте N1 и с двумя дополнительными лентами на лентах N1 и N2 (а); Потери на переменном токе с дополнительными лентами и без них. (б)

Сделаны следующие выводы: общая токонесущая способность макетов из нескольких параллельных лент близка к сумме критических токов лент. Распределение постоянного тока между параллельными ВТСП лентами обусловлено сопротивлением спаев и ВАХ лент, распределение на переменном токе – индуктивностью лент, а на высоком уровне ВАХ – еще и сопротивлением ВТСП лент. Потери в ВТСП ТНЭ СОТ на переменном токе возникают при пиковых токах в основном на участках с высоким уровнем электрического поля – находящихся в большем магнитном поле или на «слабых местах» лент. Потери на основной длине проводника незначительны, как и потери при рабочем токе много ниже номинального. Дополнительная ВТСП лента на крайних витках компенсирует краевые эффекты поля. Методики численного моделирования СОТ, проверенные при обсчете экспериментов, позволяют моделировать различные режимы работы СОТ.

Глава 4 посвящена разработке конструкций, созданию и исследованию образцов гибких сильноточных ТНЭ малого диаметра, исследованиям и выбору ВТСП лент для них.

В разделе 1 главы 4 описана постановка задач и анализ требований для гибкого сильноточного геликоидального ТНЭ. Для многих перспективных ВТСП магнитов и электроэнергетических устройств понадобятся ТНЭ с рабочими токами, превышающими максимальные токи единичных ВТСП лент в десятки и даже сотни раз (токамаки).

Требования к параметрам ТНЭ лежат в весьма широком диапазоне, но в общих чертах их можно сформулировать так:

1. ТНЭ обеспечивают высокие рабочие токи, причем из экономических соображений желательно иметь ток ТНЭ, близкий к сумме токов лент, и коэффициент использования ленты по длине и ширине, близкий к единице (прямые ленты или крутая спираль).
2. Для магнитных систем, в первую очередь, важна механическая устойчивость под действием растягивающих и сдавливающих сил, то есть плотная, но в то же время не жесткая структура ТНЭ. Для всех применений важна способность ТНЭ к изгибу с минимальным радиусом от нескольких сантиметров до десятков сантиметров. Для токоподводов имеет значение «самонесущая» конструкция ТНЭ. Спиральная укладка ВТСП лент обеспечивает гораздо более высокую устойчивость к растяжению, чем единичная лента или стопка лент.
3. Допустимый уровень потерь в переменных режимах может быть обеспечен полным или частичным транспонированием ВТСП лент в ТНЭ с минимальным шагом. Частичное транспонирование обеспечивается многослойной геликоидальной структурой ТНЭ – каждый слой ВТСП лент на круглом или на плоском закругленном формере состоит из нескольких ВТСП лент, намотанных в параллель по спирали. Кроме того, при такой структуре среднее сопротивление резистивного контакта между различными лентами минимально, что способствует перераспределению тока между лентами при любой локальной неоднородности. В частности, это помогает решить проблему «горячих пятен», вызываемых изредка встречающимися падениями криттока лент на малой длине.
4. Термодинамическая стабильность, то есть устойчивость ТНЭ к энергетическим возмущениям, может обеспечиваться достаточным количеством нормального металла (меди) в сечении ТНЭ, эффективностью охлаждения ТНЭ и возможностью перераспределения тока по сечению между ВТСП и нормальным металлом.
5. Технологичность изготовления и применения ТНЭ. Для эффективного применения в большинстве крупных устройств и токоподводов желательна возможность проточного охлаждения на уровне конструкции самого ТНЭ, а не обмотки. Технологичность намотки магнитов обеспечивается ТНЭ круглого или плоского с закруглениями сечения, также как и легкость изолирования, дополнительной тепловой стабилизации, механического упрочнения (конduit, упрочненный формер). Каждое из перечисленных в пунктах 1-4 качеств нуждается в возможности усиления по требованиям текущей задачи.

Таким образом, геликоидальная конструкция ТНЭ с круглым или плоским закругленным формером с внутренними каналами может обеспечить одновременное соответствие наибольшему числу приведенных требований. Сравнение проводилось с такими конструкциями, как ребель, стопка лент (твистированная или прямая), различные конструкции ТНЭ из многих ребелей и стопок лент.

В разделе 2 главы 4 описаны методики исследования ВТСП лент и ТНЭ.

В разделе 3 главы 4 описаны предварительные исследования и выбор ВТСП лент для применения в геликоидальных токонесущих элементах. Для рассмотрения возможности применения в геликоидальных ТНЭ были предварительно отобраны 3 типа ВТСП лент 2-го поколения (Таблица 1).

Для этих ВТСП лент были измерены:

- ВАХ нескольких коротких прямых образцов лент на постоянном токе при 77 К в поле собственного тока. Произведена оценка разброса значений критических токов по длине для лент SuperPower и SuNAM (Таблица 1);
- Для ленты SuperPower SCS4050 AP – зависимость тока при 1 мкВ/см от деформации сжатия и растяжения ВТСП слоя в перпендикулярном поле 0,5 Тл при температуре 77 К. Сжатие ВТСП слоя вызывает меньшую деградацию – целесообразна намотка ВТСП слоем вниз;
- ВАХ лент, намотанных на трубку диаметром 6 мм геликоидально с шагом ~ 18 мм сверхпроводящим слоем вниз и сверхпроводящим слоем вверх (Таблица 2);

- Зависимости криттоков лент SuperPower и SuNAM от величины внешнего поля, перпендикулярного либо параллельного поверхности ленты, до 0,6 Тл при 77 К;
- Угловые зависимости криттоков лент SuperPower и SuNAM от внешнего поля 0,1 и 0,5 Тл, поворачивающегося в плоскости, перпендикулярной оси ленты при 77 К;
- ВАХ ленты SuperPower на токе 50 Гц в поле собственного тока при 77 К.
- Зависимость транспортных потерь от амплитуды переменного тока.

Таблица 1. Исследованные ВТСП ленты.

Производитель и тип ленты, год выпуска	ВТСП слой	Подложка	Покрытие	Ширина, толщина	Ток при 77К
SuperPower, SCS4050 AP, 2010	(Gd-Zr)BCO	Хастеллой 50 мкм	Медь, по 20 мкм	4,2 мм, ~100мкм	95А ± 3%
AMSC	YBCO	Ni5at%W 100 мкм	Медь, по 50 мкм	4,5 мм, ~200мкм	120А
SuNAM, 2011	GdBCO	Хастеллой 60 мкм	Медь, по 20 мкм	4,2 мм, ~100мкм	220А ± 4%

Таблица 2. Токи лент, намотанных на трубку диаметром 6 мм с шагом ~18 мм.

ВТСП лента	Ток при 1 мкВ/см, А	Ток при 10 мкВ/см, А	Лента прилегает к трубке
SuperPower «ВТСП вниз»	96	104	Плотно
SuperPower «ВТСП вверх»	15	18	
AMSC «ВТСП вниз»	Резистивность от 0	75	Седлообразная форма ленты
AMSC «ВТСП вверх»	0	0	
SuNAM «ВТСП вниз»	225	238	Почти плотно
SuNAM «ВТСП вверх»	0	0	

По результатам исследования ВТСП лент сделаны выводы: Токонесущая способность исследованных лент гораздо устойчивее к деформации сжатия, чем к деформации растяжения. При геликоидальной намотке деградация криттока обусловлена продольной деформацией до достижения необратимой деградации. При геликоидальной намотке на малый диаметр ВТСП слоем вниз ленты 2-го поколения не деградируют или деградируют незначительно. Ленты SuperPower и SuNAM и, вероятно, другие ленты с подложкой ~ 50-60 микрон пригодны для намотки ВТСП слоем вниз на диаметр несколько мм, ленты с более толстой подложкой пригодны для геликоидального ТНЭ только при диаметрах ~ 10-15 мм. Лента SuperPower SCS4050 AP (с улучшенным пиннингом) наиболее пригодна для ТНЭ полевых применений, а лента SuNAM – для применений ТНЭ в малых полях с большими рабочими токами.

В разделах 4, 5 и 6 главы 4 описано устройство для изготовления коротких образцов ТНЭ, расчет геометрии образцов и изготовление образцов ТНЭ. Для экспериментальных образцов ТНЭ были выбраны типы лент, согласно выводам предыдущего раздела, производства SuperPower и SuNAM (Таблица 1).

Формер должен обеспечивать механическую устойчивость и одновременно гибкость и не должен повышать уровень электрических потерь в кабеле от тока и внешнего поля на переменном токе, а также в импульсном режиме. Поэтому для первых образцов изготовлены формеры плотно скрученные из 3000 проволок (нержавеющая сталь) диаметром 0,1 мм. В дальнейшем применялись также формеры в виде медных трубок с целью осуществления проточного охлаждения и дополнительной тепловой стабилизации.

Требования к токовым терминалам – минимум резистивных потерь в них и технологичность изготовления ТНЭ.

Требования к технологии автоматизированного изготовления образцов:

- отсутствие деградации токонесущей способности лент при намотке;
- плотность укладки лент на формер;
- зазоры между лентами для гибкости ТНЭ;
- намотка параллельными лентами всего слоя или нескольких слоев за проход;
- автоматическая раскладка, регулировка шага транспонирования;
- возможность различных конструкций токовых терминалов и креплений.

В экспериментальном устройстве для автоматизированной намотки образцов геликоидального ТНЭ натяжение лент независимо, регулируемо и не превышает предельного натяжения, допустимого для ленты (1-2 кг). Формер выполняет функцию ведущего вала, а отдающие валы с лентами движутся параллельно формеру и пропорционально скорости его вращения. Управление движением отдающей части осуществляется автоматически. Угол намотки лент регулируется в зависимости от шага транспонирования и диаметра формера. Произведен расчет соотношений углов, диаметров и шага транспонирования, а также соотношения скоростей вращения приемной и движения отдающей частей намоточного устройства.

Изготовлены 3 коротких образца ТНЭ. Их параметры приведены в Таблице 3. Позже еще 2 образца N4 и N5, параметры которых также приведены в Таблице 3, были изготовлены на устройстве для изготовления длинномерных кусков ТНЭ.

Таблица 3. Изготовленные образцы ТНЭ.

N обр.	Лента	Число лент	Число слоев	Длина	Шаг, мм	Угол, °	Диаметр формера, мм	Расход ленты на 1 м ТНЭ, м
1.1	SuperPower SCS 4050 AP	4	1	20 см	23	45	7	5,6
1.1i		4	1 (изол)					
1.2		8	2					11,2
1.3		16	4					22,4
2	SuperPower SCS 4050 AP	16	4	75 см	36	30	6,5	19
3	SuNAM	8	2	17 см	36	30	6,5	9,5
4	SuperPower SCS 4050 AP	16	4	1 м	30	27	6,34	19
5	SuperPower SCS 4050 AP	16	4	10 м	30	27	6,34	19

В разделах 7 и 8 главы 4 описаны исследования коротких образцов ТНЭ. Исследованы образцы с параметрами, приведенными в Таблице 3. Проведены измерения ВАХ на постоянном и на переменном токе, в полях собственного тока и во внешних полях при температурах 77 К и 65 К в жидком азоте и при 4,2 К в жидком гелии. По ВАХ на переменном токе вычислены транспортные потери на переменном токе при 77 К в жидком азоте в полях собственного тока и во внешнем перпендикулярном поле, синхронном с током. Криттоки образцов приведены в Таблице 4. Проведены исследования на постоянном и на переменном токе образца, изолированного двумя слоями каптона (полиимида). По гистерезису ВАХ изучались нагрев этого образца и теплоотдача в жидкий азот, они сравнивались с нагревом и теплоотдачей неизолированных образцов (Таблица 5). При 65 К в жидком азоте под откачкой критические токи удваиваются с учетом влияния собственного поля. На постоянном токе в перпендикулярном поле 7,7 Тл при 4,2 К в жидком гелии получен критток 4050 А – сумма

криттоков лент, по данным для ленты. Образцы не деградировали при сгибе на диаметр 300 мм, а также после распрямления. Проведены экспериментальные исследования стабильности образцов при импульсном сверхтоке, а также расчеты распределения температур и мощности тепловыделения.

Проведены механические испытания при помощи разрывной машины на деформацию в жидком азоте при 77 К с измерением ВАХ при различных значениях приложенной силы. Воздействие имитирует, во-первых, намотку на бобину, во-вторых, силы, действующие на ТНЭ в обмотке – растяжение и прижатие. ВАХ характеристики не изменились до приложенной силы 100 кг, что показывает возможность намотки и перемотки с натяжением 50 кг на бобину 300 мм и больше.

Таблица 4. Токи образцов ТНЭ при 77 К.

Образец	Ток при 1 мкВ/см, А	Ток при 10 мкВ/см, А	Примечания
N1.1	332	415	Перераспределение тока между лентами на неоднородном контакте, используется критерий 10 мкВ/см
N1.1i	332	412	
N1.2	523	845	
N1.3	1200	1550	
N2	1450	1590	Изогнутый на диаметр 290 мм
N3	1630	1775	И прямой, и изогнутый на диаметр 310 мм

Токонесущая способность образцов ТНЭ при 77К в собственном поле на постоянном токе не более чем на 7% меньше суммы токов лент из-за перераспределения токов, разброса токонесущей способности лент по длине (Таблица 1) и влияния собственного поля. Проведен расчет распределения поля методом конечных элементов для 1 и 2-слойной модели ТНЭ и оценка влияния собственного поля на критические токи образцов.

В разделе 9 главы 4 произведена оценка коэффициента теплоотдачи образцов ТНЭ в жидкий азот. При постоянном токе и установившейся температуре уравнение теплового баланса можно записать в виде:

$$E \cdot I = h \cdot p \cdot (T - T_0),$$

где I – транспортный ток, E – напряженность электрического поля, p – охлаждаемый периметр, T – температура ВТСП слоя, T_0 – температура хладагента, h – коэффициент теплообмена ВТСП слоя с хладагентом.

Из уравнения теплового баланса и гистерезиса ВАХ произведена оценка h (Таблица 5).

Таблица 5. Нагрев ВТСП слоя в образцах, оценка по гистерезису ВАХ.

Образец	Мощность тепловыделения, Вт/м	Ток, А	Разогрев ВТСП слоя, К	h (1), Вт/мК
1 слой без изоляции	1,5	430	~ 0,15	
1 слой изол.*	1,25	420	~ 0,5	~ 2,5 **
Без изоляции	5	1640	~ 0,25	~ 15

*Изоляция – 2 слоя 40 микронной каптоновой ленты

**теплосъем в азот с изолированного образца в 4 раза хуже

В разделах 10 и 11 главы 4 произведено численное и экспериментальное моделирование процессов при наличии энергетических возмущений в ТНЭ. Простейший способ оценить критические энергетические возмущения, вызывающие переход токонесущего

элемента в нормальное состояние, это вычислить их в адиабатическом приближении, пренебрегая охлаждением и теплопроводностью обмотки. Энергия, необходимая для нагрева ТНЭ от рабочей температуры T_0 , до температуры $T_0 + T_m$, при которой рабочий ток становится критическим:

$$\Delta W = \int_{T_0}^{T_0+T_m} C(T) dT,$$

где $C(T)$ – теплоемкость ТНЭ.

В Таблице 6 представлены рассчитанные таким образом критические энергии для ТНЭ из 16 ВТСП лент и из 40 ВТСП лент на медной трубке.

Таблица 6. Критические энергии ТНЭ из 16 и из 40 ВТСП лент на медной трубке.

Т _{раб.} , К	Q, 16 лент, Дж/м	Q, 40 лент, Дж/м										
	1 К	2 К	5 К	10 К	300 К	500 К	1 К	2 К	5 К	10 К	300 К	500 К
20	1,47	3,4	12,2	37	14335	30000	2,13	4,9	17,3	52	21000	43600
30	6,5		38				9		52,7			
50	17,6	35,7					25	51				
65	25,8	52,2					37,3	75,6				
77	33						47,6					

Но для ВТСП такой способ дает слишком грубую и пессимистичную оценку, не учитывающую влияние теплопроводности и охлаждения при разности температур в несколько К. С другой стороны, необходимо рассмотреть влияние возможных локальных понижений токонесущей способности ТНЭ.

Были проведены численные расчеты распределения температуры и напряженности электрического поля по математической модели, учитывающей: мощность охлаждения; теплопроводность ТНЭ и теплоотдачу через обмотку; размытую вольтамперную характеристику; возможные неоднородности токонесущей способности по длине ТНЭ; размеры, продолжительность и мощность энергетических возмущений.

Уравнение баланса энергии в ТНЭ с учетом всех этих факторов:

$$I(t)E(I, B, T, x) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \Delta W(t, x) = C \frac{\partial T}{\partial t} + p\alpha(T - T_{out})$$

где I – ток, j – плотность тока, ρ – удельное сопротивление, T – температура сечения, x – координата сечения вдоль длины ТНЭ, t – время, λ – коэффициент теплопроводности метра ТНЭ, C – усредненная теплоемкость ТНЭ на длину, α – коэффициент теплопередачи в хладагент (или в обмотку), p – охлаждаемый периметр, T_{out} – температура хладагента или окружающей обмотки, $\Delta W(t, x)$ – плотность энергетического возмущения.

Проведены эксперименты по тепловому переводу ТНЭ импульсами тока до $1,7 I_c$, длительностью до 1 секунды и их обсчет по вышеприведенной модели. Температура выше 90 К вычислялась по сопротивлению ТНЭ. При обсчете использовались экспериментальные значения напряженности электрического поля, а также ВАХ вида:

$$E_{ТНЭ}(I, B, T) = E_0 \left(-\frac{I}{I_c} (B, T) \right)^{n(B, T)}, \text{ при } I \leq I_{sh/2}(B, T)$$

$$E_{ТНЭ}(I, B, T) = I \cdot \rho_{ТНЭ}(T) f(I, B, T), \text{ при } I > I_{sh/2}(B, T),$$

где $I_{sh/2}$ находится из уравнения:

$$E_0(-I/I_c(B,T))^{n(B,T)} = 0.5 \cdot I_{sh/2}(B,T) \cdot \rho_{ТНЭ}(T)$$

А $f(I,B,T)$ имеет вид:

$$f(I,B,T) = 0,5(1 + T \cdot a \cdot n \cdot h \cdot (I - I_{sh/2}(B,T)) / I_0(B,T))$$

Получено удовлетворительное совпадение экспериментальных данных, расчетов на основе эксперимента и расчетов на основе модельной ВАХ при однородном возмущении на ТНЭ с однородной токонесущей способностью. Сделан вывод о допустимости применения данной методики для более точной оценки минимальных критических возмущений и для моделирования тепловых процессов в ТНЭ.

В разделе 12 главы 4 описаны расчеты распределения поля собственного тока в образцах и оценка влияния поля собственного тока на токонесущую способность. Проведен ряд расчетов распределения собственного поля методом конечных элементов в моделях токонесущего элемента: геликоидальных с разным числом слоев, количеством и шириной лент, с поверхностными и объемными токами, а также плоских с разным числом и расположением лент. По величине поля и полевой зависимости критического тока лент можно оценить уменьшение критического тока токонесущего элемента по сравнению с суммой критических токов лент. Поля во всех моделях являются тангенциальными. В 4-х слойной модели с поверхностными токами тангенциальное поле составило ~ 15, 25, 35 и 45 мТл для 1-го, 2-го, 3-го и 4-го слоев лент с токами 100 А. Снижение токонесущей способности лент SCS4050 AP в таком внешнем поле составляет от ~ 2% во внутреннем до 7% во внешнем слое. Влияние собственного поля объясняет снижение криттока 4-х слойного ТНЭ на 4-5% по сравнению с «суммой криттоков лент».

В разделе 13 главы 4 проведен расчет деформации сжатия ВТСП слоя лент в образцах и оценка влияния деформации на критические токи.

Применен подход, описанный в работах [2] и [18], деформация сжатия ВТСП слоя:

$$\varepsilon_{YBCO}(r, p) = (l_{YBCO} - l_{neutral}) / l_{neutral} = (((1/4p^2 + (r+c)^2 4\pi^2)^{1/2}) / ((1/4p^2 + (r+c+12t)^2 4\pi^2)^{1/2}) - 1$$

где p – двойной шаг транспонирования, r – радиус формера, c – толщина слоя меди, t – толщина подложки.

Оценен эффективный радиус намотки лент в образцах, вычисляемый по формуле:

$$r_{eff} = -t/2\varepsilon$$

Он сравнивается с минимально допустимым радиусом намотки (изгиба) ВТСП лент r_{min} , указанным производителями. Результаты расчетов деформации, оценки влияния деформации на критический ток и эффективные радиусы намотки приведены в таблице 7.

Таблица 7. Результаты расчетов деформации и оценок критического тока лент в образцах ТНЭ и образцах единичных лент с геликоидальной намоткой.

ВТСП лента	Образец	ε (%)	$I_c/I_c(\varepsilon=0)$	r_{eff} (mm)	r_{min} (mm)
SuperPower	Ø 6 мм, шаг 18 мм	-0,435	0,97	5,7	5,5 ^a
AMSC	Ø 6 мм, шаг 18 мм	~ -0,85	~ 0,65	~ 5,8	15
SuNAM	Ø 6 мм, шаг 18 мм	-0,52	0,96	5,7	<15
SuperPower	Образец ТНЭ N1	-0,326	0,99	7,7	5,5 ^a
SuperPower	Образец ТНЭ N2	-0,188	1	13,3	5,5 ^a
SuNAM	Образец ТНЭ N3	-0,226	1	13,3	<15

^a и для сжатия и для растяжения ВТСП слоя при изгибе

По результатам измерений токонесущей способности образцов ТНЭ и ВТСП лент и расчетов влияния собственного поля и деформации сделан вывод, что наблюдаемое снижение криттоков без внешнего поля вызвано влиянием собственного поля. Деформация ВТСП при изготовлении ТНЭ не вызывает уменьшения токонесущей способности лент. Критток образца

ТНЭ в жидком гелии в поле несколько Тл практически является суммой криттоков ВТСП лент в перпендикулярном поле такой амплитуды.

Сделаны следующие выводы: созданы образцы геликоидальных гибких сильноточных токонесущих элементов малого диаметра из ВТСП лент 2 поколения на формере из нержавеющей стали. Применена технология автоматизированной намотки коротких образцов (до 1 м) гибкого геликоидального ТНЭ. Проведены исследования и отбор ВТСП лент для применения в геликоидальном ТНЭ. Проведены комплексные экспериментальные и расчетные исследования образцов ТНЭ. Токонесущая способность лент в ТНЭ не ухудшается из-за деформации при изготовлении. Полученные характеристики, а именно токонесущая способность, радиус изгиба, механическая устойчивость, и термодинамическая стабильность достаточны для применения ТНЭ в магнитных системах и токопроводах. Успешно применена и проверена при обчете экспериментов методика численного моделирования тепловых процессов в ТНЭ.

В главе 5 описаны рекомендации по производству и применению гибкого геликоидального сильноточного ТНЭ. Рассмотрены следующие перспективные применения геликоидального ТНЭ:

1. Тороидальный магнит термоядерного источника нейтронов.
2. Магнитная система межорбитального плазменного двигателя мощностью 1-200 МВт.
3. Магнитные системы для экранирования космических аппаратов от заряженных частиц и для создания искусственной магнитосферы на планетарных базах.
4. Гибкие токопроводы с проточным охлаждением для устройств ускорительной техники.
5. Прототип СПИН мегаваттного класса.

ВТСП 2-го поколения обладает тремя основными преимуществами перед НТСП: значительно более высокими магнитными полями, в которых сохраняется достаточная рабочая плотность тока, значительно более высокой термодинамической стабильностью во всем диапазоне рабочих режимов и возможностью работать при температурах выше жидкого гелия, что создает удобство охлаждения. Сильноточные транспонированные токонесущие элементы необходимы во всех крупных или импульсных магнитах из соображений снижения индуктивности и увеличения технологичности изготовления, надежности, оптимизации систем охлаждения, диагностики и защиты.

В устройствах термоядерного синтеза наиболее важны высокие рабочие поля и термодинамическая стабильность в условиях радиационной тепловой нагрузки и рабочих токов в десятки кА при огромных механических напряжениях и плотностях тока.

Простота охлаждения делает ВТСП ТНЭ незаменимым для крупных перспективных космических магнитных систем и устройств, то есть плазменных двигателей мощностью 1-200 МВт, в дальнейшем – термоядерных реактивных двигателей и магнитов для экранирования космических аппаратов от заряженных частиц.

Гибкие токопроводы для соединения сверхпроводниковых устройств с тоководами и между собой могут применяться в ускорителях частиц и других устройствах. Большой адронный коллайдер потребует ~ 1000 км сверхпроводниковых токопроводов.

СПИН с запасенной энергией ~ 1-10 МДж могут питать импульсные нагрузки на различных космических, атмосферных и других компактных аппаратах. Здесь важны легкость поддержания рабочей температуры, полевые свойства, стабильность.

Возможно применение геликоидального ТНЭ и в ряде других устройств: электродвигатели, в основном для флота, электрогенераторы – ветрогенераторы, а также электрогенераторы на космических кораблях и базах, имеющих ядерный реактор с турбинным преобразователем по соображениям компактности и легкости устройства, токоограничители индуктивного типа, высокополевые вставки в магнитах ускорителей частиц.

В разделе 1 главы 5 описано экспериментальное устройство для изготовления длинномерных кусков геликоидального ТНЭ и устройств из него. Производство геликоидального сильноточного ТНЭ требует создания специальных намоточных устройств, работающих на принципе квазижесткого позиционирования ВТСП лент. Основной трудностью

при изготовлении геликоидального ТНЭ со столь малыми диаметрами формера является стабильная надежная намотка лент без повреждения довольно хрупкого ВТСП слоя. Первые образцы были изготовлены на автоматизированном устройстве, пригодном для изготовления кусков ТНЭ до 1 метра, в силу того, что ленты наматывались вращением формера, а позиционировались линейным перемещением. Для изготовления длинных (до 100 метров, после небольшой переделки и больше) кусков ТНЭ и обмоток из них было создано экспериментальное автоматизированное устройство, эскиз и внешний вид которого показаны на Рисунке 4.

Формер перематывается между бобинами примерно одного метра в диаметре, а ВТСП ленты (а также изоляция, стабилизатор и т.д.) наматывается на формер под фиксированными углами при помощи двух обкруточных платформ, вращающихся синхронизировано с движением формера, что определяет шаг намотки. На каждой из обкруточных платформ находится 8 бобин для лент, натягиваемых независимо регулируемыми двигателями постоянного тока.

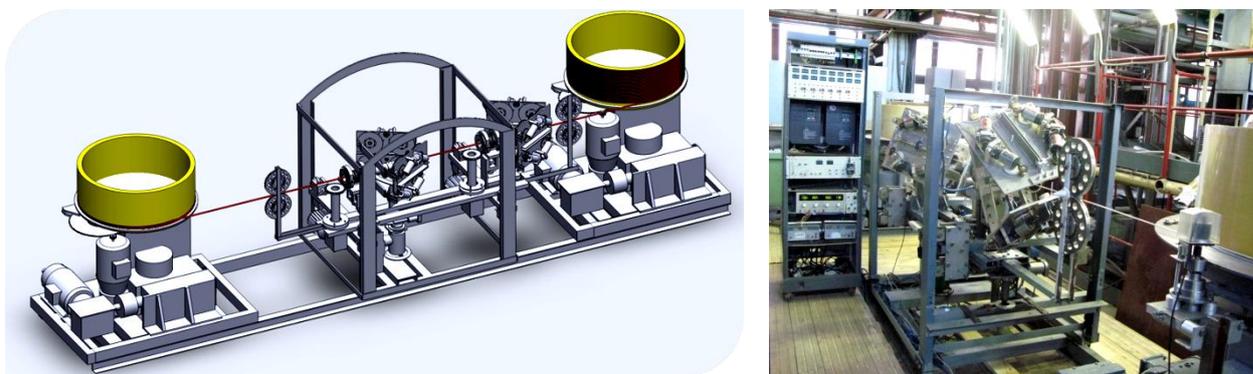


Рисунок 4. Эскиз устройства для изготовления ТНЭ (а); его фотография (б).

Каждая обкруточная платформа может вращаться в любую сторону с программно задаваемой угловой скоростью относительно движения формера. Натяжение формера – регулируемое до 100 кг (на стальном тросе и медной трубке предполагается до 50 кг). Натяжение ВТСП лент примерно 1 кг. Скорость перемотки формера в диапазоне 10-50 мм/с. Вертикальное позиционирование обкруточных платформ производится так, чтобы формер все время находился на центральной оси, по мере намотки формера на приемную бобину и сматывания с отдающей бобины.

На данном устройстве после отладки (с использованием лент из нержавеющей стали вместо ВТСП) изготовлены 2 образца ТНЭ – пробный, длиной 0,5 метра, и длинномерный, длиной 10 метров. Оба образца были изготовлены из 16 ВТСП лент, намотанных в 4 слоя за один проход на формере в виде медной трубки с внешним диаметром 6,34 мм и толщиной стенок 0,75 мм.

Пробный образец испытан в жидком азоте при 77 К и показал ВАХ, свидетельствующую о том, что в ходе изготовления ТНЭ на устройстве не происходит деградации ВТСП лент. Устройство успешно функционирует, на нем можно изготавливать длинномерные куски ТНЭ и отрабатывать технологию производства.

В разделе 2 главы 5 произведена оценка геометрических параметров геликоидальных ТНЭ из различных типов ВТСП лент различных производителей. Зависимости критических токов от деформации сжатия и растяжения лент SuperPower, а также лент Bruker и American Superconductor взяты из работы [20].

Произведена расчетная оценка минимального диаметра формера, исходя из критической «поперечной» деформации и из «продольной» деформации при геликоидальной намотке под углом 30°, не вызывающей снижения криттока.

Оба подхода дали не противоречащие друг другу оценки. Для лент Bruker со 100 мкм подложкой минимальный диаметр формера составляет 10-12 мм, но при 50-60 мкм подложке можно снизить диаметр до 6 мм. Намотку следует производить ВТСП слоем вверх. Ленты American Superconductor могут быть намотаны на минимальный диаметр 12 мм сверхпроводником вниз. Новые ленты SuperPower с 30 мкм подложкой могут быть намотаны ВТСП слоем вниз на диаметр всего 3 мм без деградации.

В разделе 3 главы 5 описана конструкция прототипа 20 кА токнесущего элемента для токамака-гибридера ТИН (термоядерный источник нейтронов). Предполагаемые условия работы тороидального магнита ТИН, проектируемого в настоящее время в России, являются довольно тяжелыми для ниобий-оловянного ТНЭ, как по совокупности поля, плотности тока и механических напряжений, так и по радиационной тепловой нагрузке. Разрабатывается конструкция геликоидального ТНЭ из ВТСП-2 для тороидального магнита ТИН с проточным охлаждением газообразным гелием, током 20-33 кА при рабочей температуре 5-20 К и полем на обмотке 12-20 Тл. Максимальное поле тороидальных магнитов из ВТСП-2 ТНЭ будет ограничено только механическими свойствами обмотки, а тепловая стабильность на ~1-3 порядка выше, чем у НТСП ТНЭ. Обоснована возможность изготовления ТНЭ с требуемыми для ТИН габаритами и значениями рабочих параметров (с запасом) уже при использовании серийных современных ВТСП-лент 2-го поколения.

Предлагается ТНЭ с плоским закругленным формером с размерами ~13x6 мм, имеющим два канала для охлаждения газообразным или жидким гелием. Изоляция наматывается поверх ВТСП лент, и такой ТНЭ, с максимальными габаритами ~20x14 мм, вкладывается в стальной конduit 25x25 мм, что соответствует требованиям конструкции тороидального магнита ТИН. Конduit будет работать с корпусом как единое целое, обеспечивая приемлемый уровень механических напряжений.

При использовании современной серийной (2010-2013 г.г.) ВТСП ленты поле 12 Тл на обмотке может быть достигнуто при рабочей температуре 20 К, запасе 10 К, ТНЭ с рабочим током 20 кА из 286 лент, намотанных в 32 слоя. Прогресс в свойствах ВТСП лент позволяет рассчитывать, что ко времени постройки ТИН (~ 2025 г.), потребуется меньшее число ВТСП лент из-за улучшения токнесущей способности в поле хотя бы в 2-3, а то и в 5 раз. Успехи в создании искусственных центров пиннинга и нанесении толстых слоев ВТСП позволяют рассчитывать на это.

Целесообразно изготавливать из ВТСП ТНЭ лишь внутреннюю часть тороидальных обмоток ДЕМО-ТИН, работающую в полях от ~ 9-10 до 12 Тл – это существенно снижает стоимость материала тороидального магнита. Именно эта внутренняя часть магнита находится в условиях, которые могут превысить возможности ниобий-оловянного ТНЭ, как по полю, так и по радиационной тепловой нагрузке. Целесообразно использовать для ВТСП вставки проточное охлаждение жидким гелием, как и для НТСП обмоток. При рабочей температуре 5 К с запасом 5-10 К число ВТСП лент еще меньше, перспективы повышения поля лучше, а термодинамическая стабильность на порядок выше, чем у НТСП. Повышенная стабильность ВТСП ТНЭ в жидком гелии вызвана тем, что из-за высокой критической температуры ВТСП, запас по току у ВТСП ТНЭ всего в ~ 20% создает запас по температуре в ~5 К. При запасе ниобий-оловянного ТНЭ по току ~ 50% тепловой запас составит всего 1-2 К.

Ток в 20 кА в поле 12 Тл при температуре 5 К и запасе ~ 5 К может быть получен при применении ТНЭ из ~ 120 современных ВТСП лент и, возможно, всего из ~ 40-60 лент после 2020 года. Поле на обмотке 20 Тл при 5 К может быть достигнуто с использованием 20 кА ТНЭ из ~ 150 современных или 50-80 перспективных ВТСП лент.

Сделаны следующие выводы:

1. Применение ТНЭ из ВТСП 2-го поколения в магнитных системах ТИН и других термоядерных устройств позволит существенно повысить магнитное поле и термодинамическую стабильность по сравнению с НТСП магнитами.
2. Геликоидальный ВТСП-2 ТНЭ является перспективным для термоядерных и гибридных электростанций, в коммерческих электростанциях его использование будет необходимо.

3. Целесообразно применение геликоидального ВТСП ТНЭ уже в проектируемых сегодня термоядерных устройствах, в том числе в ДЕМО-ТИН.

В разделе 4 главы 5 приведены рекомендации к применению геликоидального сильноточного ТНЭ в магнитных системах плазменных двигателей. Конструкция плазменного безэлектродного электрореактивного двигателя большой мощности (1-200 МВт) с магнитной термоизоляцией для межорбитальных буксиров предполагает использование высокочастотного нагрева плазмы. Такие двигатели смогут повысить скорость межпланетных экспедиций на 1-2 порядка по сравнению с химическими двигателями и обеспечить на порядки меньший расход топлива за счет принципиально неограниченной скорости рабочего тела. В перспективе на их основе может быть сделан термоядерный реактивный двигатель (ТЯРД), где увеличение температуры плазмы будет происходить за счет термоядерной реакции.

Рассмотрена конструкция магнитной системы и комплекс оборудования для обеспечения ее рабочей температуры и питания, конструкции магнитных систем для 300 кВт (прототип для наземных и космических испытаний), 1 МВт (лунный буксир) и 20 МВт (экспедиция к Марсу и т.д.) двигателей. Приведен состав оборудования, параметры магнитных систем, оценка массы всех устройств и необходимого количества ТНЭ.

Имея в виду такие крупные магниты, какие нужны для двигателей мощностью 20-200 МВт и ТЯРД, стоит сразу делать магнитные системы из сильноточного ТНЭ, начиная с прототипов двигателя, с целью проработки технологий. Магнитные системы предполагаются галетного типа для центральной части (магнитная пробка) и секционированные соленоиды для областей геликонного резонанса, ионно-циклотронного резонанса и сопла. Охлаждение – проточное газообразным гелием, резервированное контактным охлаждением. Рабочая температура может быть ~ 20-30 К с запасом ~ 5 К.

Первые магнитные системы для применения в прототипах двигателей, а также в двигателе лунного буксира, могут быть изготовлены уже сейчас при современном состоянии технологий производства ВТСП ленты и сильноточного геликоидального ТНЭ.

Приведены рекомендации к применению геликоидального сильноточного ТНЭ для экранировки космических аппаратов магнитным полем и другие применения в дальних пилотируемых экспедициях.

1. В дальних космических экспедициях и при патрулировании межпланетного пространства необходима комплексная защита от радиации, включающая в себя магнитную экранировку. Система экранировки от заряженных частиц магнитным полем может представлять собой тор из ВТСП галет с диаметром внутреннего отверстия в несколько метров. Поле должно составлять несколько Тл, температура – 20-30 К с запасом 5-10 К. Охлаждение – проточное газообразным гелием и контактное как резерв. Учитывая, что такая магнитная система по масштабу приближается к исследовательскому термоядерному реактору, полномасштабное применение таких систем из ВТСП возможно в перспективе 10-20 лет, когда могут появиться соответствующие объемы производства ВТСП.
2. Уже в настоящее время могут быть изготовлены системы, создающие искусственное магнитное поле Земли на планетарных базах с характерными размерами в десятки метров. Магнитное поле, близкое к земному, необходимо для длительного нормального функционирования экипажа, размножения и роста животных и растений. Учитывая величину необходимого магнитного поля, оно может быть создано одновитковыми петлями из ВТСП ТНЭ в гибких криостатах, возможно, замкнутыми сверхпроводящими петлями или низкорезистивными петлями с подпиткой.
3. Для 20 МВт генератора применение ВТСП может в разы снизить массу и габариты, что показывают работы по генераторам с обмотками из НТСП. В генераторах такой мощности будет необходимо применение сильноточных транспонированных ТНЭ.

В разделе 5 главы 5 описан длинномерный прототип гибкого токоподвода с проточным охлаждением для ускорительных магнитов. В ускорителях частиц для питания магнитов, удаленных от источников тока, могут быть применены сверхпроводниковые токоподводы.

Например, проект модернизации Большого адронного коллайдера включает в себя ~ 1000 км ВТСП токоподводов с токами до нескольких десятков кА. В России строится ускорительный комплекс NICA (ОИЯИ, г. Дубна), в который входят нуклотрон, бустер и коллайдер. Магниты каждого из ускорительных колец могут быть запитаны через сверхпроводниковые токоподводы, температура которых может быть выше 4,2 К. Охлаждаться токоподводы могут газообразным гелием, испаряющимся в системе охлаждения магнитов, или жидким гелием. Рабочие токи магнитов нуклотрона 6 кА (до 9 кА в импульсе), бустера и коллайдера – 12 кА (до 18 кА в импульсе).

Изготовленный на экспериментальном устройстве десятиметровый кусок ТНЭ из 16 ВТСП лент на медной трубке может являться прототипом длинномерного токоподвода. Критические токи этого токоподвода, рассчитанные с учетом поля собственного тока, составляют свыше 18 кА при температуре 5 К, свыше 12 кА при 10 К и свыше 9 кА при 20 К. Сделан вывод, что данный токоподвод с проточным охлаждением может быть использован для питания любых вышеперечисленных магнитов NICA.

В разделе 6 главы 5 сформулированы рекомендации к применению ТНЭ для магнитной системы прототипа СПИН и аналогичных магнитов. Проведена оценка максимальных токов, полей на обмотке и значений запасенной энергии прототипа магнитной системы СПИН в виде соленоида из 500 м ТНЭ (~ 10 км ленты SuperPower SCS4050 AP 2010 г.), см. Таблицу 8.

Параметры соленоида: внутренний радиус, высота и толщина обмотки – по ~ 0,175 м; число витков 306 в 9 двойных галетах по 34 витка; индуктивность ~ 0,4 Гн.

Доля запасенной энергии накопителя, которая может быть использована в практических целях, составляет примерно 40-70% от максимальной энергии. ТНЭ представляет собой 16 лент на формере из медной трубки диаметром ~ 6 мм, он вложен в стальной конduit с внешним сечением ~ 10x10 мм. Охлаждение – проточное переохлажденным жидким азотом, водородом, газообразным или жидким гелием.

Таблица 8. Максимальные значений энергии, тока и поля прототипа СПИН.

Температура, К	Энергия, МДж	Максимальное поле, Тл	Максимальный ток, А
65	0,5	1,7	1600
40	1,6	3,1	2800
30	2,2	3,6	3300
20	2,8	4,1	3800
4,2	4,7	5,25	4800

В разделе 7 главы 5 представлены результаты расчета стабильности токонесущих элементов перспективных магнитных систем. Математическая модель была применена та же, что и при обчете экспериментов, но со степенной ВАХ для слегка пессимистичной оценки критической энергии теплового срыва. Были произведены расчеты для ТНЭ импульсного магнита СПИН и тороидального магнита ТИН. В расчетах учитывались локальные, кратковременные, объемные и постоянные возмущения энергии в рабочих режимах, а также различные режимы охлаждения. Токонесущая способность ТНЭ считалась либо однородной по длине, либо с локальными «провалами». Пример результата расчетов в сравнении с аналогичными данными по НТСП ТНЭ приведен в Таблице 9.

Таблица 9. Сравнение критических энергий токонесущего элемента ТИН при 20 кА 12 Тл.

Токонесущий элемент, температура, запас, охлаждение	Энергетическое возмущение	кВт/м	Вт/м ³	кДж/м	Дж/м ³
ТНЭ ТИН из 286 лент	Объемное	0.5	10 ⁶		~ 10 ⁶

20 К + 10 К, GHe	длительное				
	Локальное 2 см 0.2 с			2	$4 \cdot 10^6$
ТНЭ ТИН из 286 лент 20 К + 10 К, LH ₂	Объемное длительное	3-4	$6 \cdot 8 \cdot 10^6$		$\sim 10^6$
	Локальное 2 см 0.2 с			2.5	$5 \cdot 10^6$
ТНЭ ТИН из 286 лент 10 К + 5 К, GHe			$\sim 10^5$		$\sim 10^5$
НТСП, 5 К + 1 К, LHe аналогичного класса				$0.5 \cdot 5 \cdot 10^{-3}$	$\sim 10^3 \cdot 10^4$

По расчетным исследованиям стабильности сделаны следующие выводы:

- мощность охлаждения в разы повышает критические энергии возмущения при равномерном длительном возмущении;
- неоднородность токонесущей способности почти не влияет на переход при мощном охлаждении, но снижает критические энергии возмущения при «слабом» охлаждении;
- при локальном кратковременном возмущении охлаждение мало влияет на критическую энергию возмущения;
- неоднородность токонесущей способности не влияет на переход при любом охлаждении, если локальное возмущение не совпадает с неоднородностью, а находится рядом с ней.

Возможные причины возмущений с таким высоким значением плотности энергии: потери при импульсном разряде СПИН, срыве тока плазмы в токамаке; радиационная тепловая нагрузка в токамаке, тепловая нагрузка в плазменном двигателе; «ливень» частиц в ускорителе; попадание частицы с высокой энергией, в ускорителе или космической системе. Механические возмущения энергии, по-видимому, недостаточны для теплового срыва ВТСП ТНЭ.

Сделаны следующие выводы: разработан способ изготовления длинномерных кусков сильноточного геликоидального ВТСП-2 ТНЭ. Создано и успешно применяется экспериментальное устройство для изготовления длинномерных (100 и более метров) кусков такого ТНЭ. Изготовлен длинномерный (10 м) кусок ТНЭ. Рассмотрены применения геликоидального ТНЭ в магнитных системах токамаков, в плазменных межорбитальных двигателях, для радиационной защиты космических аппаратов, в индуктивных накопителях энергии. Создан прототип гибкого токоподвода с проточным охлаждением. Численно исследованы тепловые процессы в различных устройствах из геликоидального ТНЭ по методике, предварительно проверенной при обсчете экспериментов.

В заключении изложены основные выводы работы:

1. На основании проведенных расчетных и экспериментальных исследований подготовлены научно обоснованные рекомендации для конструкций сильноточных ВТСП-2 ТНЭ, оптимизированных для конкретных применений в магнитных системах и электроэнергетических устройствах различного назначения.
2. Разработан способ изготовления длинномерных (100 и более метров) кусков сильноточного геликоидального ТНЭ с рабочими токами до 100 кА и создано соответствующее экспериментальное производство.
3. Разработаны конструкции и изготовлены образцы сильноточного геликоидального ТНЭ, позволяющие существенно улучшить параметры магнитных систем перспективных токамаков и других крупных магнитов, а также дающие возможность создания высокоэффективных магнитных систем для плазменных двигателей мощностью 1-200 МВт, импульсных СПИН, различных электроэнергетических устройств и ВТСП токоподводов с рабочими токами в десятки кА. Проведенные исследования образцов геликоидального ТНЭ показали пригодность данного типа ТНЭ для использования в вышеперечисленных перспективных устройствах.
4. Разработаны конструкции сильноточных ТНЭ с рабочими токами до 900 А, токоограничивающих модулей и резистивных СОТ на напряжение до 27,5 кВ, создано экспериментальное устройство для их изготовления.
5. Проведенные исследования и разработки резистивных СОТ позволят создать ряд промышленных устройств с различными требуемыми параметрами ограничения тока короткого замыкания для распределительных электросетей (рабочие токи 0,25-2 кА, напряжения до 35 кВ, время восстановления 1-5 с).

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

- [1] Keilin V.E., Sytnikov V.E., Dolgosheev P.I., Polyakova N.V., Slavov G.G., Akimov I.I., Boev A.I., Ivanov A.N., Kovalev I.A., Lelehev S.A., Novikov M.S., Novikov S.I., Shcherbakov V.I. Study of HTS Coaxial Cable Models, 2003, IEEE Trans. On Appl. Superconductivity, Vol. 13, N2, pp. 1934-1937.
- [2] Кейлин В.Е., Лобынцев В.В., Новиков М.С., Новиков С.И., Щербаков В.И. Конструкция и результаты испытаний макетного ВТСП ограничителя резистивного типа, Препринт ИАЭ-6634/10, Москва, 2010, 5 стр.
- [3] Keilin V.E., Lobyntsev V.V., Novikov M.S., Novikov S.I., Shcherbakov V.I. Design and Test Results of a 1MVA Resistive Type Fault Current Limiter, 2012, Physics Procedia, N36, pp. 1215 – 1218.
- [4] Keilin V.E., Lobyntsev V.V., Novikov M.S., Novikov S.I., Shcherbakov V.I. Investigation of Current Distribution in Multi-Tape HTS Samples, 2012, Physics Procedia, N 36 pp. 1225 – 1230.
- [5] Кейлин В.Е., Лобынцев В.В., Новиков М.С., Новиков С.И., Щербаков В.И. Исследование распределения токов в токонесущих ВТСП элементах, состоящих из нескольких проводников, Труды 1-ой научной конференции по прикладной сверхпроводимости, Москва, 2011, с. 163-170.
- [6] Novikov M.S., Keilin V.E., Novikov S.I. Preparation and Experimental Investigation of Heavy-Current Transposed HTS Conductors, 2013, IEEE Trans. On Appl. Superconductivity, Vol. 23, N3, 4 pp.
- [7] Кейлин В.Е., Новиков М.С., Новиков С.И. Изготовление и экспериментальные исследования гибких геликоидальных сильноточных ВТСП токонесущих элементов, Москва, 2014, Электричество, N1, с. 48-55.
- [8] Кейлин В.Е., Новиков М.С., Новиков С.И., Шуваев С.А. Геликоидальные сильноточные гибкие компактные токонесущие элементы из ВТСП лент 2-го поколения, Труды 2-ой научной конференции по прикладной сверхпроводимости, Москва, 2013, с. 338-347.
- [9] Новиков М.С., Иванов Д.П., Новиков С.И., Шуваев С.А. Токонесущий элемент на основе ВТСП 2-го поколения для магнитной системы термоядерного источника нейтронов, Москва, 2014, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, Т.37/ 4, с. 22-29.
- [10] Новиков М.С., Жильцов В.А., Кулыгин В.М., Новиков С.И. Применение высокотемпературной сверхпроводимости в перспективных космических аппаратах с ядерными энергодвигательными установками, материалы XII Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского»/Сборник докладов, 2015, стр.131