

Федеральное государственное бюджетное учреждение
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

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»

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д. т. н. профессор Кейлин В.Е.

Москва 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	7
1.1 Современные ВТСП ленты.....	7
1.2 Перспективные сильноточные ВТСП устройства.....	13
1.3 Способы изготовления сильноточных ТНЭ из ВТСП лент 2-го поколения.....	14
1.4 ВТСП ТНЭ для магнитных систем устройств термоядерного синтеза (УТС).....	21
1.5 Магнитные системы космического применения.....	30
1.5.1 Плазменные двигатели.....	30
1.5.2 Магнитное экранирование космических аппаратов от заряженных частиц.....	37
1.5.3 Создание искусственного земного магнитного поля.....	39
1.6 Индуктивные накопители энергии.....	40
1.7 Ускорители частиц.....	43
1.8 Индуктивные СОТ.....	43
1.9 Резистивные СОТ.....	47
1.10 Расчетные и экспериментальные исследования стабильности сверхпроводников при тепловых возмущениях.....	50
2 РАЗРАБОТКА СОТ РЕЗИСТИВНОГО ТИПА И ТНЭ ДЛЯ НИХ.....	54
2.1 Постановка задач для разрабатываемых СОТ.....	54
2.2 Анализ проблем, возникающих при разработке СОТ, и путей их решения.....	54
2.3 Исследования ВТСП лент для резистивных СОТ.....	56
2.4 Тепловой переход и проблема «горячих пятен».....	59
2.5 Защита ВТСП ленты резистивной фольгой.....	64
2.6 Расчет длины ТНЭ, необходимой для ограничения тока.....	64

2.7 Конструкция, технология изготовления и испытания модулей на ток 250А.....	67
2.8 Конструкция и испытания прототипа СОТ на 250 А 3,5 кВ.....	70
3 РАЗРАБОТКА ТНЭ ДЛЯ ПРОТОТИПА СОТ НА 900 А 27,5 КВ.....	75
3.1 Проектирование прототипа СОТ на 900 А 27,5 кВ.....	75
3.2 Разработка конструкции и исследования образцов ТНЭ для СОТ на 900А.....	76
3.3 Эффект собственного поля на крайних лентах крайних витков, шунтирование дополнительной ВТСП лентой.....	81
4 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ ГИБКИХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ТНЭ МАЛОГО ДИАМЕТРА.....	86
4.1 Технические требования к гибкому сильноточному ТНЭ.....	86
4.2 Разработка методик для исследования лент и ТНЭ.....	89
4.3 Предварительные исследования ВТСП лент для применения в геликоидальных токонесущих элементах.....	91
4.4 Разработка конструкции и изготовление образцов геликоидального ТНЭ.....	95
4.5 Расчет конструкции (геометрии) образцов ТНЭ.....	97
4.6 Разработка устройства для изготовления коротких образцов ТНЭ.....	100
4.7 Комплексные исследования коротких образцов ТНЭ.....	103
4.8 Механические испытания на разрывной машине.....	108
4.9 Оценка коэффициента теплоотдачи в жидкий азот.....	109
4.10 Экспериментальные исследования стабильности ТНЭ.....	110
4.11 Расчетные исследования стабильности ТНЭ.....	112
4.12 Расчет собственного поля и анализ его влияния для многослойных ТНЭ.....	114
4.13 Расчет деформации сжатия ВТСП слоя лент в образцах и кабелях и оценка влияния деформации на ток.....	115
5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ, ПРИМЕНЕНИЮ	

ГЕЛИКОИДАЛЬНОГО ТНЭ И ПО РАЗРАБОТКЕ УСТРОЙСТВ НА ИХ ОСНОВЕ.....	118
5.1 Разработка экспериментального устройства для производства гибкого геликоидального ТНЭ и обмоток магнитных систем из него.....	120
5.2 Оценка параметров перспективных ТНЭ из различных ВТСП лент.....	121
5.2.1 Рекомендации по изготовлению магнитов из ТНЭ и к конструкциям ВТСП лент.....	126
5.3 Конструкция геликоидального ТНЭ для ТИН.....	127
5.4 Применения ТНЭ в магнитных системах перспективных межорбитальных плазменных двигателей мощностью 1-200 МВт.....	134
5.5 Гибкие токоподводы с проточным охлаждением.....	145
5.6 Рекомендации по применению ТНЭ для СПИН.....	148
5.7 Расчеты стабильности ТНЭ в магнитных системах.....	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	171
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	175
СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	184
БЛАГОДАРНОСТИ.....	186

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена разработке конструкций, изготовлению и исследованиям образцов сильноточных токонесущих элементов (ТНЭ) из высокотемпературных сверхпроводниковых (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, рассматриваемые в диссертации – разработка 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 с ТНЭ из многих параллельных ВТСП лент;
- разработка гибких токоподводов для ускорительных магнитов и устройств термоядерной энергетики;
- разработка прототипа сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии (СПИН) мегаджоульного класса для применений в энергетике и на транспорте.

Кроме того, рассматриваются возможности применения гибкого геликоидального ТНЭ в таких устройствах, как:

- магнитные системы токамаков, особенно высокополевые вставки для тороидальных магнитов;
- магнитные системы для мощных межорбитальных плазменных двигателей и магнитной защиты космических аппаратов от радиации заряженных частиц;
- магнитные системы ускорителей частиц (высокополевые вставки);
- электромшины;
- токоограничители индуктивного типа.

При разработке ТНЭ для этих устройств должны учитываться их токонесущая способность, потери, радиус изгиба, механическая устойчивость,

тепловая стабильность, технологичность изготовления. Особым классом высокоточных ВТСП устройств являются резистивные токоограничители, ТНЭ которых должен быть устойчив к многократным перегрузкам по току, многократным быстрым разогревам и иметь малое время охлаждения до рабочей температуры.

Таким образом, цели данной работы можно кратко сформулировать так:

1. Разработка конструкций и создание прототипов ТНЭ резистивных СОТ из многих параллельных ВТСП-2 лент, исследование их параметров в рабочих условиях, подготовка к производству и рекомендации к применению.
2. Разработка конструкций гибкого высокоточного ТНЭ малого диаметра из ВТСП-2 лент, намотанных геликоидально многими параллельными лентами в несколько встречных слоев на гибкие формеры. Изготовление и комплексные исследования образцов ТНЭ. Разработка технологии изготовления геликоидального ТНЭ. Создание экспериментальной универсальной установки для изготовления длинномерных кусков геликоидального ТНЭ, и устройств из него. Рекомендации к применению различных конструкций гибкого ТНЭ в магнитных системах и электроэнергетических устройствах.

Научная новизна работы состоит в том, что разработаны и исследованы различные конструкции ТНЭ, созданы экспериментальные устройства для изготовления ТНЭ, выработан подход к изготовлению высокоточных ТНЭ и устройств из них.

Практическая ценность: применение ТНЭ разработанных конструкций и автоматизированных устройств для изготовления ТНЭ позволит создать высокоточные ВТСП-2 магнитные системы и электроэнергетические устройства различных классов, в том числе упомянутые выше.

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Современные ВТСП ленты

Современные ВТСП ленты 2-го поколения представляют собой сверхпроводниковые провода, в которых слой ReBCO (Re – редкоземельный элемент, Y, Gd, Eu или Dy, BCO – барий-медь-кислород) керамики нанесен различными способами на металлическую (хастеллой, нержавеющей сталь) подложку. Пример конструкции современной ВТСП ленты 2-го поколения SCS4050 производства компании SuperPower приведен на рисунке 1.1. На этом рисунке виден 1 мкм слой иттриевой керамики (толщина слоя ReBCO составляет в современных лентах от 0,8 до ~8 мкм), несколько различных буферных слоев толщиной от 7 до 80 нм, необходимых для образования правильной структуры ReBCO керамики на подложке. При различных методиках изготовления используется разное количество и толщина буферных слоев. Сама подложка, с текстурированной специальным образом поверхностью (на рисунке 1.1 – 50 мкм слой хастеллоя С276), имеет в различных конструкциях ВТСП лент толщину от 30 до 100 мкм. Поверх слоя ВТСП керамики наносится 1-2 мкм слой серебра для защиты ВТСП керамики от вредного для нее влияния атмосферы и для создания электрического контакта. Для этой же цели (контакт), а также для термодинамической и электродинамической стабилизации ВТСП ленты, наносится слой меди (обычно класса очистки М00) толщиной от 20 до 50 мкм. Слой меди может не наноситься, если нужно получить ленту с малой продольной теплопроводностью (токовводы) или с большим сопротивлением в несверхпроводящем состоянии (токоограничители). Кроме того, вместо меди или вместе с медью можно наносить латунь, сталь, другие материалы для получения нужных тепловых, электрических и механических свойств. Ширина лент 4-12 мм, причем в любых устройствах, где важна величина потерь, обычно применяются ленты 4-5 мм ширины.

ВТСП лента 2-го поколения, по данным на конец 2014 года, производится несколькими компаниями в США (SuperPower, AMSC, STI), в Японии – Fujikura, корейской компанией SuNAM, в Германии – компаниями Bruker и THEVA (последняя – не в промышленном масштабе).

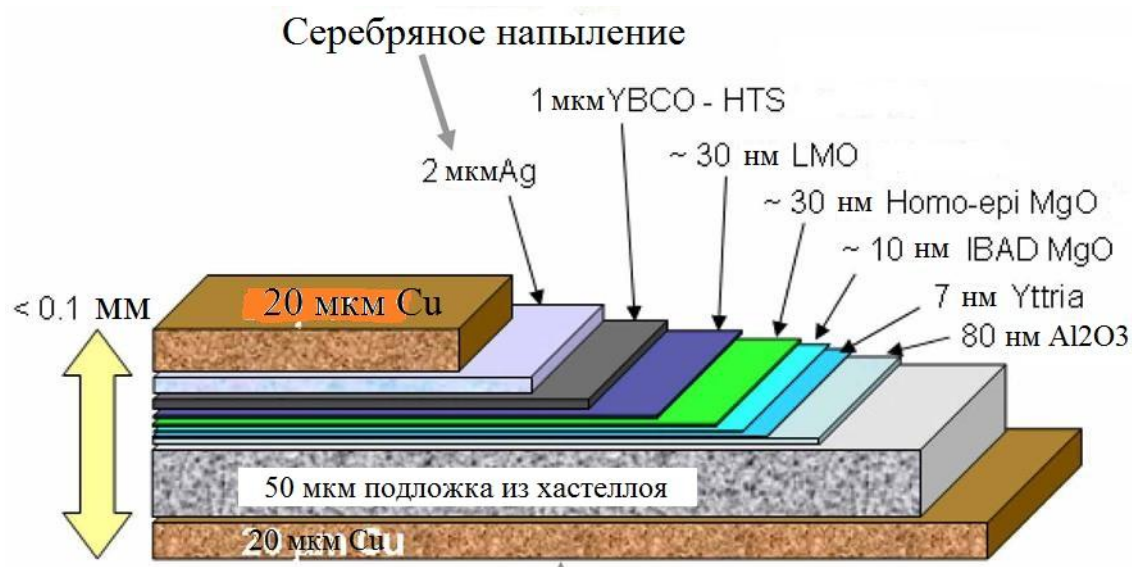


Рисунок 1.1 – Современная ВТСП лента производства компании SuperPower

Основными преимуществами ВТСП лент 2-го поколения перед НТСП является возможность получения значительно более высоких магнитных полей, более высокая термодинамическая стабильность, и во всех задачах, кроме получения высоких полей, более легкое поддержание рабочей температуры.

Зависимость критического поля ReBCO керамики от температуры приведена на рисунке 1.2, видно, что максимальные магнитные поля ВТСП-2 магнитов будут ограничены только механическими свойствами обмоток, поскольку достаточная рабочая плотность тока может быть получена даже при температурах 20-30 К в полях 20-30 Тл. Это преимущества особенно важно для токамаков, ускорителей частиц и высокополевых лабораторных магнитов.

Термодинамическая стабильность (критическая энергия теплового возмущения) ВТСП лент 2-го поколения при всех рабочих температурах, в том числе при гелиевых температурах, объясняется высокой критической температурой ReBCO. При промежуточных температурах – от 10 К до азотных

температур, термодинамическая стабильность повышается еще на 1-3 порядка благодаря увеличению теплоемкости и теплопроводности материалов обмоток и эффективности охлаждения с повышением температуры. На рисунке 1.3 показаны зависимости теплоемкости и теплопроводности от температуры для некоторых материалов, составляющих существенную часть обмотки.

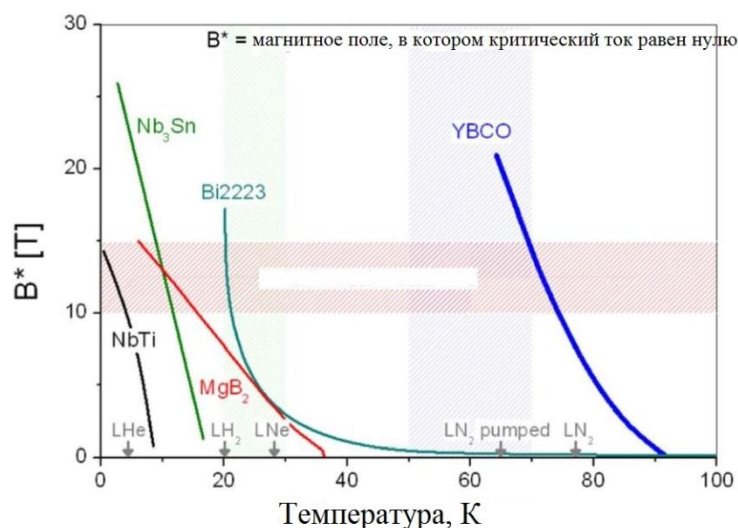


Рисунок 1.2 – Сравнение максимальных магнитных полей различных сверхпроводников [1]

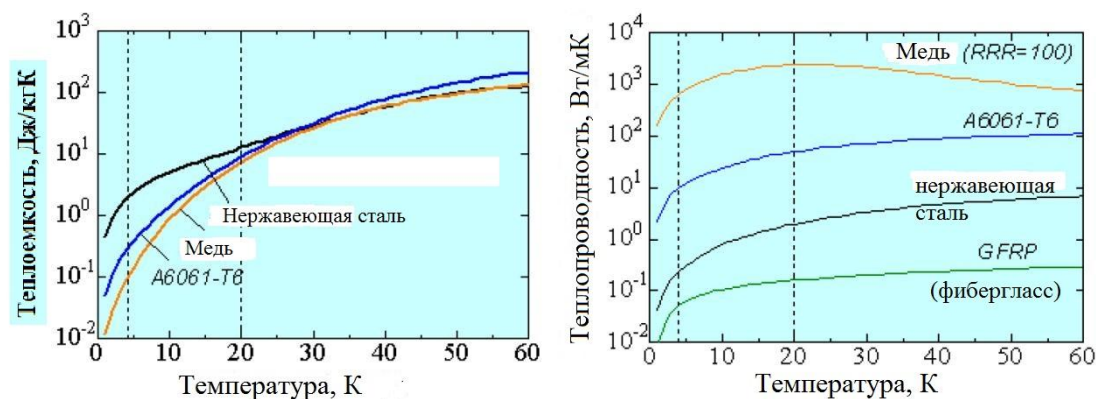


Рисунок 1.3 – Удельная теплоемкость и теплопроводность некоторых материалов, входящих в состав токонесущих элементов и конструкций магнитов [2]

Критические энергии тепловых возмущений и сравнение стабильности ВТСП и НТСП магнитов рассмотрены в работе [3]. На рисунке 1.4 представлены

характерные значения энергии тепловых возмущений, возникающих в обмотках магнитов.

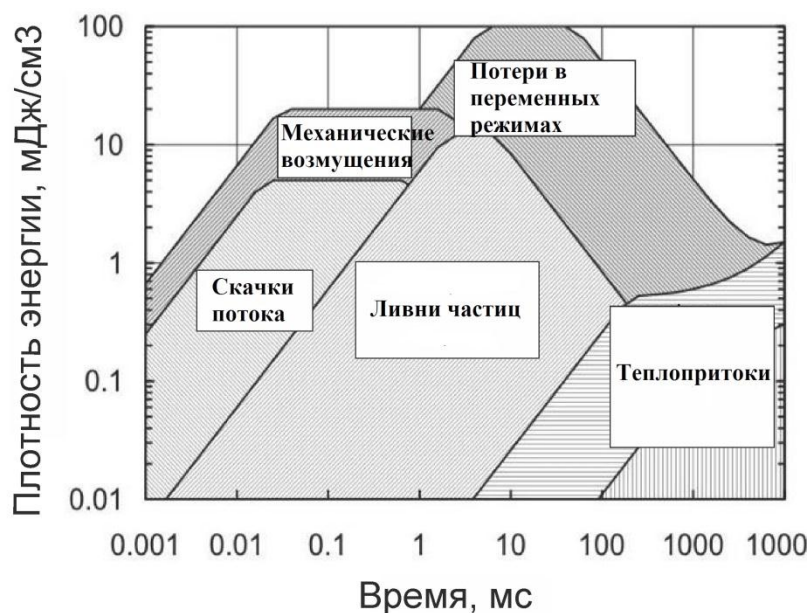


Рисунок 1.4 – Плотность энергии и длительность тепловых возмущений в магнитах [3]

Еще одно важное преимущество ВТСП – это возможность работать при температурах выше температуры жидкого гелия. Для магнитных систем диапазон 10-40 К позволяет получить достаточную рабочую плотность тока в обмотках в магнитном поле, а многие электромашины, гибкие токоподводы, ограничители тока КЗ могут работать при охлаждении жидким азотом при температурах 65-78 К. Весь диапазон рабочих температур ВТСП-2 устройств может быть получен при помощи компактных криокулеров, что представляет собой огромное преимущество при работе на малогабаритных аппаратах в космосе, в авиации и на флоте, а также в лабораториях. Для космических применений имеет значение также легкость криостатирования ВТСП при рабочих температурах 20-30 К и выше по сравнению с криостатированием НТСП при 4,2-5 К.

Возможность обходиться без жидкого гелия, дефицит которого, возможно, ожидает человечество в ближайшие десятилетия [4], позволит ВТСП устройствам серьезно расширить сферу применения.

Из недостатков ВТСП 2-го поколения на сегодняшний день (начало 2015 года) можно назвать низкий объем производства по сравнению с НТСП – всего сотни километров ленты в год во всем мире, и высокую стоимость за 1 кА-метр. Эти два взаимосвязанных недостатка связаны с низким пока еще спросом на изделия из ВТСП, а низкий спрос в свою очередь обусловлен высокой ценой и малым объемом производства, недостаточным для масштабных применений. Чтобы разорвать этот порочный круг, необходимы крупные проекты в области энергетики – термоядерные устройства, ветрогенераторы, линии электропередачи, военные заказы, крупномасштабные научные проекты, такие, как ускорители частиц с высокополевыми магнитами. Некоторые методики изготовления допускают большее удешевление при больших объемах производства, другие – меньшее, но при любом массовом производстве стоимость существенно снижается.

Со снижением цены за килоампер-метр связано устранение и еще одного недостатка ВТСП-2. Хотя плотность тока в слое REBCO составляет 2,5-3 МА/см² при 77К в собственном поле, из-за малой пока еще толщины этого слоя, в которой удастся достигнуть такой плотности тока, максимальные токи 4-5 мм лент составляют всего 100-250 А. В гелии токи примерно на порядок больше, но обычно устройства в гелии и в промежуточных температурах работают в значительных магнитных полях. В настоящее время некоторые производители ВТСП лент (THEVA, SuNAM, SuperPower), работают над увеличением толщины ReBCO слоя без ухудшения плотности тока. Успехи THEVA в 2012 году представлены на рисунке 1.5.

Кроме того, можно упомянуть успехи японской компании Fujikura, также получившей токи порядка 1000 А/см ширины, но уже на длинных образцах ленты. Корейская компания SuNAM производит серийную ленту с током в жидком азоте ~500 А/см ширины. Компания SuperPower, признанный лидер в создании

искусственных центров пиннинга, не гонится за повышением рабочего тока в поле собственного тока в жидком азоте. Но она добилась огромного прогресса в высоких полях и при пониженных температурах, за счет допирования ВТСП оксидом циркония. Вообще, над созданием искусственных центров пиннинга работают многие компании и научно-исследовательские институты по всему миру. Успехи в пиннинге, а также в увеличении толщины ВТСП, дают возможность столь оптимистичных прогнозов, как выход на стоимость ~\$5 за килоампер-метр к 2030 году. Выпускаемые в настоящее время ВТСП-2 ленты (и их объемы производства) позволяют подготовиться к грядущей коммерциализации и создать прототипы устройств, отработав все необходимые технологии. Кроме того, многие устройства, например, для космического и военного применения, а также для применения в науке, могут быть вполне успешно созданы из современных серийных ВТСП-2 лент, поскольку их цена невелика в масштабах космических, научных и военных проектов, а достигнуть необходимых параметров можно только с применением ВТСП 2-го поколения.

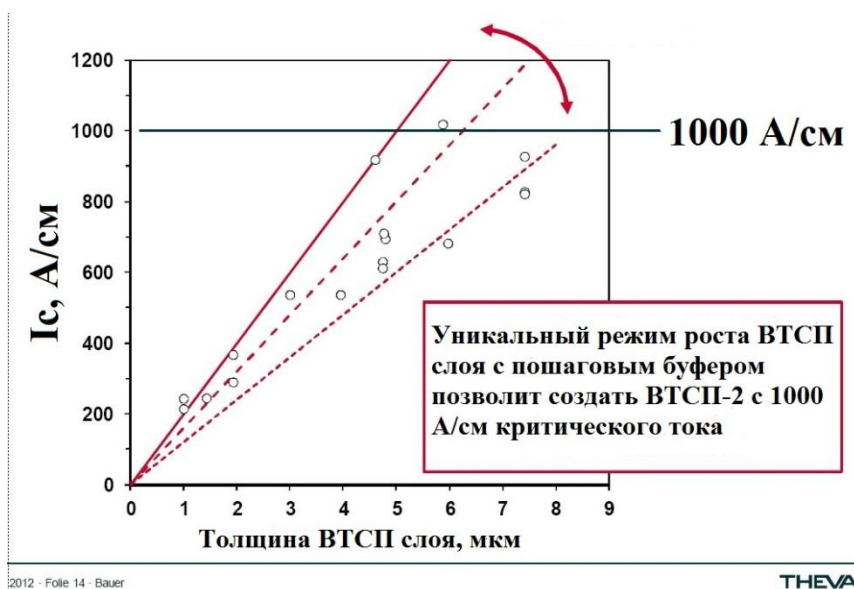


Рисунок 1.5 – Зависимость критического ток от толщины напыления образцов THEVA

1.2 Перспективные сильнотоочные ВТСП устройства

Рассмотрим некоторые классы перспективных ВТСП устройств, для которых понадобятся большие рабочие токи, и особенности их работы:

1. Тороидальные магнитные системы токамаков и их центральные соленоиды [2], как экспериментальных и коммерческих термоядерных электростанций, так и гибридеров, где термоядерная реакция является источником нейтронов для поддержания ядерной реакции. Токи могут быть в десятки кА в полях до 20-25 Тл на обмотке. Температурный диапазон 10-20К. Также поначалу будет целесообразно делать высокополевые вставки в тороидальные магниты экспериментальных токамаков, поднимающие поле с ~10 Тл до 12-20 Тл на обмотках, работающие при ~5К на проточном охлаждении жидким гелием, как и НТСП обмотки.
2. Сверхпроводящий индуктивный накопитель энергии [5], [6] – нужна низкая индуктивность, чтобы при большой скорости вывода энергии напряжение на преобразователе не превышало номинального, а, следовательно, нужен большой рабочий ток. Для СПИН различных применений рабочие температуры могут быть и 4,2 и 20-50 и 65-77 К, поля на обмотках от 1 до 20-25 Тл, а токи – килоамперы и десятки килоампер. Постоянный ток и импульсный режим с быстрым выводом энергии.
3. Токоограничители резистивного типа будут работать при 77-65 К, токи электросетей (как переменные, так и постоянные) от сотен ампер до нескольких килоампер.
4. Токовводы. Температуры самые разные, меняющиеся по длине. Для токовводов – обычно от примерно азотной до гелиевой.
5. Межпланетные космические корабли с ядерными силовыми установками. Первые корабли с ядерными реакторами и плазменными двигателями мощностью от 1 МВт могут быть построены в ближайшие 10-20 лет. Устройства, которые неизбежно будут сверхпроводниковыми, перечислены ниже.

Магнитная система плазменного двигателя (несколько Тл в большом объеме), в будущем – термоядерный реактивный двигатель, генератор электроэнергии (электромашинный или МГД) – от 1МВт до сотен мегаватт в будущем, силовые кабели, трансформаторы, СПИН, защита экипажа и электроники от заряженных частиц магнитным полем, термоядерный реактор. Все это либо невозможно сделать без сверхпроводимости, либо дает огромный выигрыш массы и объема, а также, что очень важно на космическом корабле (вокруг вакуум), в тепловыделении. Преимущество ВТСП – гораздо более удобная рабочая температура, например, 20-30К (высокая стабильность, компактная криогеника).

1.3 Способы изготовления сильноточных ТНЭ из ВТСП лент 2-го поколения

В настоящее время существуют следующие способы создания сильноточных токонесущих элементов (ТНЭ) из ВТСП лент, которые находятся в основном в стадии прототипов кабелей и первых прототипов устройств, модельных обмоток:

1. Твистированный стек (рисунок 1.6) [7], ленты складываются в стопку и твистируются, или сначала вкладываются в конduit, затем твистируются. Преимущества – высокая плотность тока, малый расход ленты, простая технология. Недостатки – форма ТНЭ, не очень удобная для намотки и принципиально неустранимые высокие кооперативные потери, шаг твиста больше 100 мм, низкая гибкость. В собственных и малых полях ТНЭ малоприменим, т.к. у него большое собственное поле, перпендикулярное ленте. Возможна его оптимизация путем создания зазоров между лентами [8], но при этом существенно снизится рабочая плотность тока. Перспективные применения данного ТНЭ в составе «кабеля в кондуите» – большие магнитные системы со стационарным полем. Такая конструкция позволяет увеличить ток примерно в 10-50 раз.

2. Рёбель (рисунки 1.7, 1.8) [9], [10] складывается из стрэндов, вырезаемых из ВТСП лент. Преимущества – низкие потери, плоский. Недостатки – большой расход дорогой ленты, сложная технология, наличие пустот (механическая нестабильность в полях).



Рисунок 1.6 – Твистированный стек (стопка) ВТСП лент

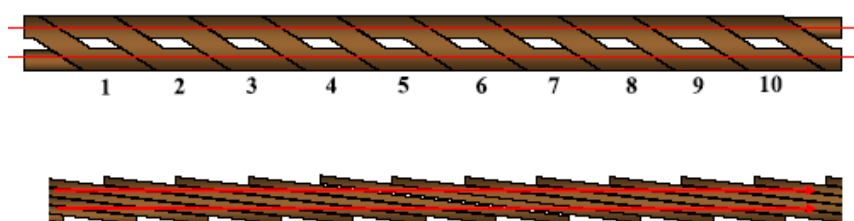


Рисунок 1.7 – Сильноточный ВТСП ТНЭ – рёбель [9] и схема агрегатирования

Основные перспективные применения рёбеля – переменный ток и импульсные режимы – трансформаторы, генераторы и двигатели с небольшими полями на обмотках. Позволяет увеличить ток примерно в 5-20 раз по сравнению с исходной лентой.

Способы еще сильнее снизить потери в рёбеле – изолирование слоев и намотка «надрезанными» лазером (striated) лентами (рисунок 1.8), ленты с немагнитной подложкой.



Рисунок 1.8 – Способы дальнейшего уменьшения потерь и увеличения рабочего тока [10]

Способы еще сильнее снизить потери в рёбеле – изолирование слоев и намотка «надрезанными» лазером (striated) лентами (рисунок 1.8 а), ленты с немагнитной подложкой.

3. Намотка обмоток параллельными лентами – некоторые магнитные системы, работающие в стационарном режиме [6] и резистивные токоограничители [11] [12], везде, где не значимы потери в переменном поле (их нет либо из-за стационарности, либо из-за нулевого собственного поля). Намотка производится либо параллельными лентами, когда нужно усиленное охлаждение [6], [11], либо стопкой лент, либо комбинировано [12]. При такой намотке необходимо уделять внимание распределению токов между лентами. Увеличение тока от 2 до 10 раз.

4. Гибкий транспонированный ТНЭ малого диаметра (CORCC – conductors on round core cable – кабель из проводников на круглом формере) (рисунок 1.9). Несколько параллельных лент геликоидально наматываются на гибкие формеры (различных конструкций, диаметра 4-7 мм). Следующий слой наматывается встречно предыдущему или в том же направлении, может меняться шаг и угол намотки, число лент в слое.

Разработка концепции этого вида кабелей из YBCO лент была начата в 2009 г. Ван дер Ланом [13], в дальнейшем в 2011 г. наиболее перспективными ВТСП лентами были признаны ленты с GdBCO керамикой [14] из-за их лучшей механической стабильности. Разработка аналогичной конструкции ТНЭ и технологии изготовления, описанные в данной работе, проводились в Курчатовском институте с 2011 г. Также подобные работы проводились во ВНИИКП. Данный вид ТНЭ является, по видимости, самым универсальным на сегодняшний день. В различных вариантах конструкции он может работать на постоянном токе, на переменном токе, в собственном или малом поле, в высоких полях, в кондуите, в режиме проточного охлаждения (на полом формере). Достоинства CORCC – относительно простая технология изготовления, малый шаг транспонирования – 20-40 мм, круглая форма, гибкость, изотропия полевой

зависимости токонесущей способности. Плотность тока примерно одинакова с твистированным стеклом, с учетом того, что последнему всегда необходим кондуит. Расход ленты 1,15-1,4 к длине кабеля, что много меньше, чем у рёбеля, хотя и больше, чем у стека. По потерям CORCC также занимает промежуточное положение. Рабочий ток может в 80 и более раз превышать ток ленты (сейчас рекордные образцы сделаны из 40 лент [15] диаметром 7,5 мм и из 79 лент [5], [16] диаметром 10 мм, но, кажется, ничто не мешает делать больше слоев).

Возможные применения CORCC:

- Токонесущий элемент для магнитных систем, в особенности работающих в импульсном режиме и с большими скоростями ввода и вывода тока, например, индуктивные накопители энергии [5], магнитные системы ускорителей. Компания Advanced Conductor Technologies LLC, основанная Ван дер Ланом, разрабатывает в настоящее время СПИН 1 МДж класса для применений в военной авиации, т.е., вероятно, в том числе для питания боевых лазеров или загоризонтных радаров. ТНЭ из 40 лент диаметром 7,5 мм нес ток 4100 А в поле 20 Тл в жидком гелии при 4,2 К. Из 20-ти ленточного ТНЭ была сделана двухслойная обмотка по 6 витков в слое на диаметре 90 мм (рисунок 5 а). Максимальная величина тока в поле 20 Тл при температуре 4,2 К составила 1950 А [15];

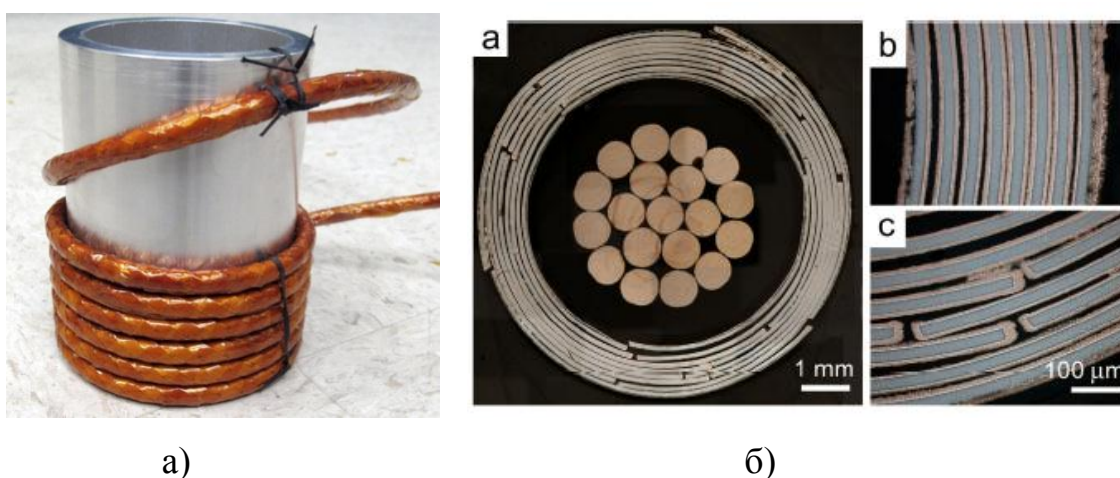


Рисунок 1.9 – Обмотка из 6 витков кабеля из 20 ленточного ТНЭ на диаметре 90 мм [15] (а); один из образцов CORCC из 40 ВТСП лент в разрезе [14] (б)

- Токонесущий элемент из многих CORCC в кондуите для токамаков;
- Обмотки трансформаторов, генераторов, корабельных электродвигателей;
- Гибкие компактные силовые кабели для флота [16].

Для ТНЭ магнитных систем может быть применена дополнительная стабилизация. Проблема воздействия деформации на токонесущую способность подробно рассмотрена в [13] и [14].

Для приведенных выше трех базовых сильноточных токонесущих элементов возможно дальнейшее агрегатирование в целях применения, например, в обмотках токамаков:

- стек заключается в конduit и затем несколько таких ТНЭ транспонируются, и затягиваются в общий круглый конduit (рисунок 10) [17]. Вопросы вызывают механические свойства и охлаждение такого ТНЭ;
- рёбель агрегируется путем геликоидальной намотки многих ТНЭ на плоский закругленный формер с каналом охлаждения (рисунок 1.11 а) [10]. Также ребели можно собирать в стек, стеки закладывать в конduit специальной формы с шагом твиста 200-300 мм (рисунок 1.11 б) [10]. Вопросы вызывают механические свойства и стоимость самого рёбеля;
- несколько CORCC можно транспонировать и затягивать в общий круглый конduit, охлаждение предполагается проточное через конduit и канал в общем формере (рисунок 1.12). Кроме того, сама конструкция подразумевает возможность намотки сотен ВТСП лент, что в совокупности с увеличением токонесущей способности перспективных лент, сможет позволить создавать ТНЭ на несколько десятков кА в полях 15-20 Тл. Такой супер-CORCC целесообразно вкладывать в стальной конduit и охлаждать протоком хладагента через полый формер.



Рисунок 1.10 – Проект «кабеля в кондуите» из нескольких ТНЭ типа «твистированный стек» [17]

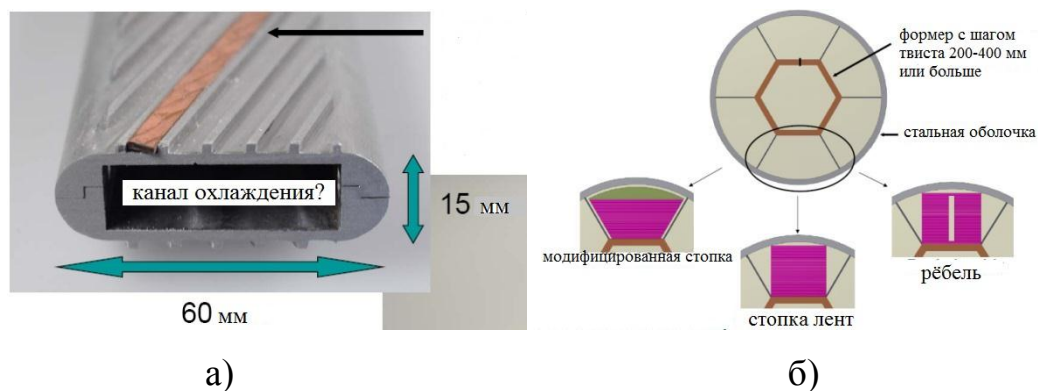


Рисунок 1.11 – Геликоидальная параллельная намотка рёбелей на полый формер с пазами [10] (а); сборка в стек, вкладывание 6 стеков в формер и транспонирование с шагом 200-300 мм [10] (б)

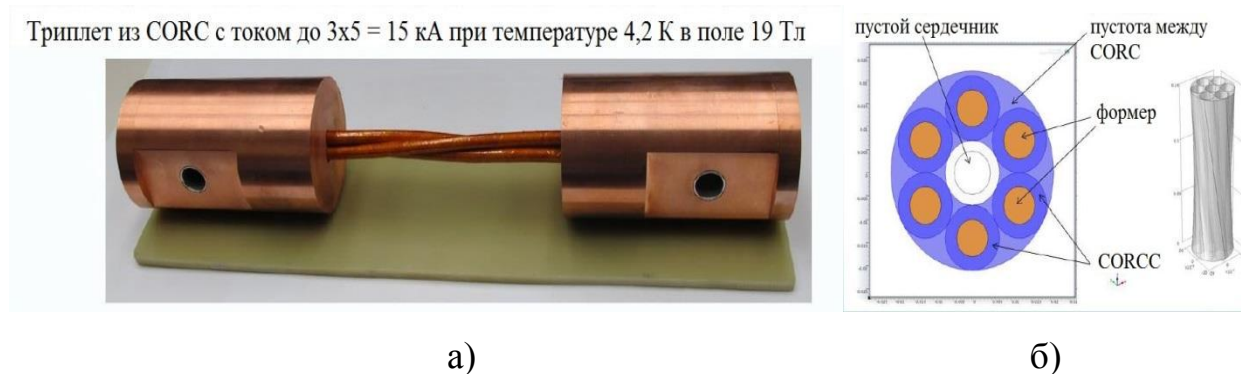


Рисунок 1.12 – Конструкции токонесущих элементов на основе CORCC [18]: образец из трех твистированных 5 кА (19 Тл 4,2 CORCC) (а); концепция ТНЭ из 6 CORCC с проточным охлаждением через общий формер и через кондуит (б)

CORCC изготавливается путем обкрутки формера ВТСП лентами. Формер может быть при этом неподвижным, либо вращаться, либо двигаться (перематываться), а обкрутка может осуществляться с бобин под натяжением в

тормозном режиме. До недавнего времени все образцы Ван дер Лана изготавливались им вручную. На рисунке 1.13 изображена кабельная машина для автоматизированного изготовления CORCC, изготовленная в 2014 году Advanced Conductor Technologies LLC [18]. Она позволяет наматывать по одному слою лент за проход формера или ТНЭ между перемоточными бобинами.

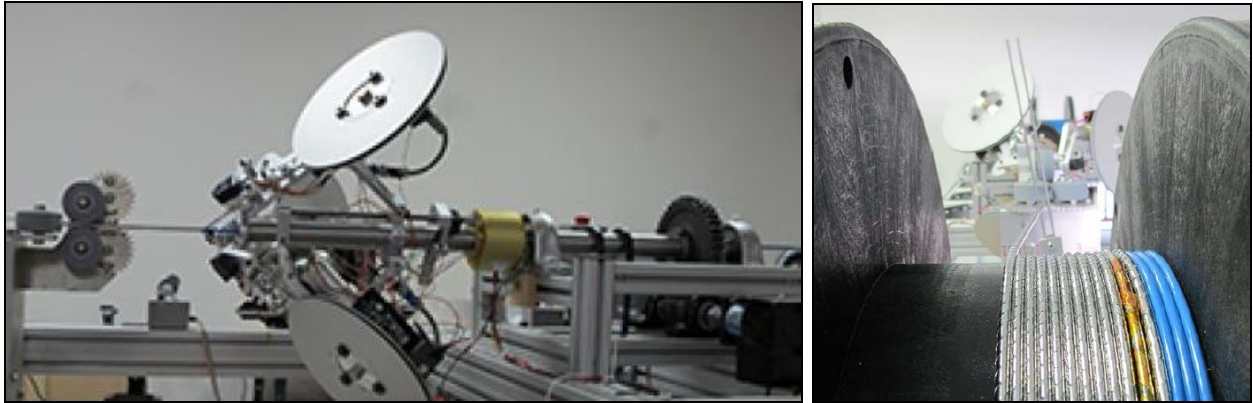


Рисунок 1.13 – Кабельная машина для намотки CORC кабелей [18]

В докладе [19] описано исследование трех ТНЭ – твистированной стопки, рёбеля и CORCC – во внешнем магнитном поле до 12 Тл. Из всех этих ТНЭ только образец CORCC совершенно не деградировал под действием пондеромоторных сил. Рёбель после 12 Тл деградировал полностью, ВАХ стала резистивной от 0 тока. Твистированная стопка деградировала на ~20%. Структура рёбеля изобилует пустотами, на края пустот опираются (и ломаются о них) ленты при сжатии рёбеля силой, направленной перпендикулярно его широкой стороне. При действии пондеромоторных сил, параллельных широкой поверхности рёбеля (в ребро), концентрация напряжения и излом лент происходят на так называемых «локтях», в местах, где вырезанные из широкой ленты стрэнды образуют углы. Там же происходят надломы ВТСП слоя при растяжении рёбеля. Этот ТНЭ также вряд ли сможет выдержать намотку под натяжением, и, по-видимому, его сфера применения – устройства с собственным полем ТНЭ или низким внешним полем. Это, например, электромшины переменного тока и трансформаторы, где низкий уровень потерь рёбеля на переменном токе может быть особенно ценен. В

твистированном стекле концентрация напряжений возникает там, где углы стопки опираются о какую-либо поверхность. Для этого ТНЭ нужен достаточно сложный кондуит и осторожность при изготовлении магнитной системы. CORCC имеет плотную структуру, поэтому каждая ВТСП лента опирается всей поверхностью о поверхность той же формы при любом сдавливании ТНЭ. Мест концентрации механических напряжений не существует. При растяжении и изгибе CORCC его ленты могут двигаться относительно друг друга и формера, а также поворачиваться, в связи с этим деградация CORCC происходит при растяжении в несколько раз большем, чем у других ТНЭ и единичных лент, а изгиб CORCC возможен даже на столь малый радиус, как ~ 30 мм [18].

1.4 ВТСП ТНЭ для магнитных систем устройств термоядерного синтеза (УТС)

Энергия магнитного поля токамаков составляет десятки и сотни гигаджоулей [1]. Напряжение при выводе тока, а в импульсном режиме и при вводе, даже при токах в десятки килоампер составляет киловольты (и это уже создает некоторые проблемы с пробоями [20]). Ток тороидальных обмоток токамаков масштаба ITER или еще более крупного перспективного DEMO составляет от 50 до 100 кА и не может быть меньше из-за допустимой величины напряжения при выводе. Рабочий ток тороидальных магнитов токамаков меньших размеров, масштаба токамака JET (например, проектируемый в России термоядерный источник нейтронов ТИН), может составлять 20-30 кА. Параметры некоторых существующих, строящихся и перспективных токамаков приведены в таблицах 1.1 и 1.2. Во всем мире ученые и инженеры, проектирующие токамаки, уже понимают, что сильноточные ВТСП ТНЭ подошли близко к предельным возможностям уже для ITER по рабочей плотности тока в поле, термодинамической стабильности, в ряде случаев по механическим свойствам и по радиационной устойчивости. Для УТС следующего поколения, как DEMO, ARIES или FFHR, рассматриваются ВТСП, имеющие преимущество по полю и

температуре. Кроме того, для перспективных коммерческих термоядерных и гибридных электростанций будет целесообразно увеличить поле на оси плазмы до 10-15 Тл, что означает поле на обмотке 20-25 Тл. Это уже возможно (для стационарных магнитов) только при применении ВТСП 2-го поколения. Кроме того, рабочая температура сверхпроводниковых магнитов УТС, которая сейчас составляет 5 К, может быть повышена до 20-30 К, что тоже, учитывая поля и плотность тока, под силу только ВТСП-2 ТНЭ. По этим причинам во всем мире уже несколько лет ведутся разработки сильноточных ВТСП-2 ТНЭ для УТС.

На рисунке 1.14 а изображен эскиз магнитной системы перспективного токамака DEMO по одной из концепций, приведенной в работе [21]. Показаны катушки тороидального магнита TF, центральный соленоид CS, и обмотки полоидального поля PF. Масштабы магнитной системы, планируемые для DEMO, видны на рисунке 1.14 б, где приведено сравнение тороидальных катушек DEMO и ITER.

Из приведенных параметров хотелось бы прежде всего обратить внимание на «запас» по рабочей температуре – почти 12 К у ВТСП проводника при запасе по току всего 30%, против 1,5 К у ниобий-оловянного ТНЭ.

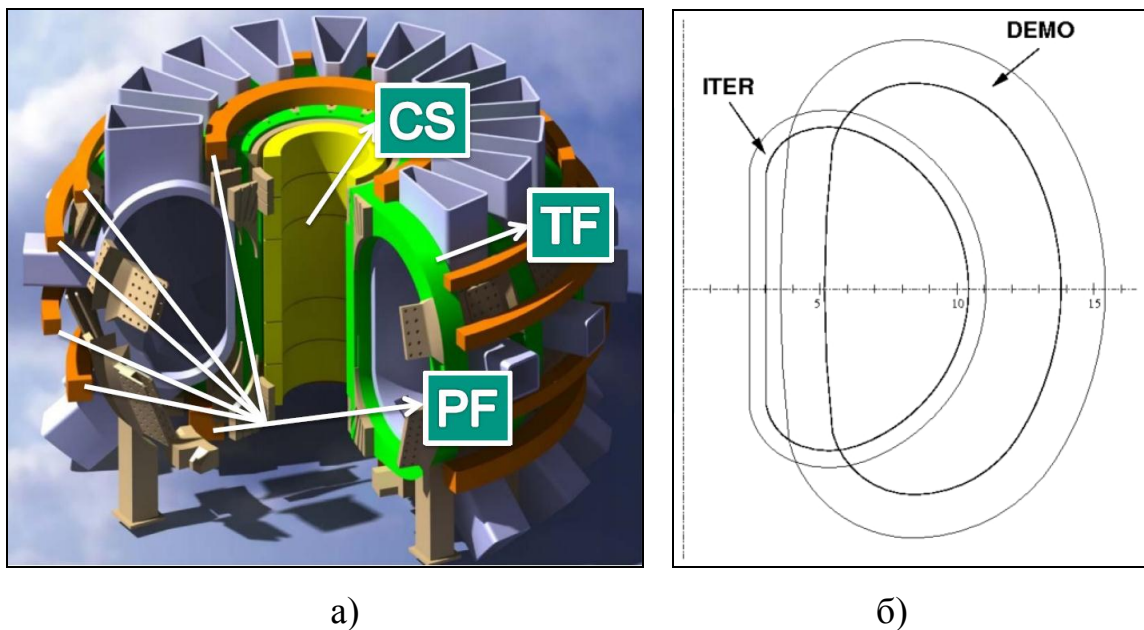


Рисунок 1.14 – Магнитная система DEMO, эскиз из [21] (а); масштаб проектируемых тороидальных катушек DEMO в сравнении с ITER (б)

Рассмотрим конструкции ТНЭ, кроме описанных в предыдущем разделе, предлагаемые для перспективных токамаков.

Таблица 1.1 – Сравнение параметров НТСП и ВТСП ТНЭ для DEMO [21]

	Предлагаемый НТСП материал	Предлагаемый ВТСП материал
	Nb ₃ Sn	ReBCO
I_{op}/I_c	-	0,7
Максимальное поле на проводнике (Тл)	13,6	13,27
Требуемое число витков	232	384
Рабочий ток (кА)	82,4	50
Индуктивность каждой обмотки (Гн)		7,28
Запасенная энергия каждой обмотки (ГДж)	9,05	9,09
Постоянная времени разряда (с)	23	30

Конструкция ТНЭ, похожая одновременно на CORCC из стопок ВТСП лент и на твистированные стопки лент в форме с каналом охлаждения и с геликоидальными пазами описана в работе [22] (рисунок 1.15 а). Изготовлен 10 кА прототип такого ТНЭ, с диаметром ~25 мм и шагом твиста 160 мм. По сравнению с CORCC такой ТНЭ имеет несколько меньшую плотность тока, немного больший (в 1,5-2 раза) шаг твиста, и гораздо меньшую возможность перераспределения тока между как стопками, так и слоями ВТСП лент.

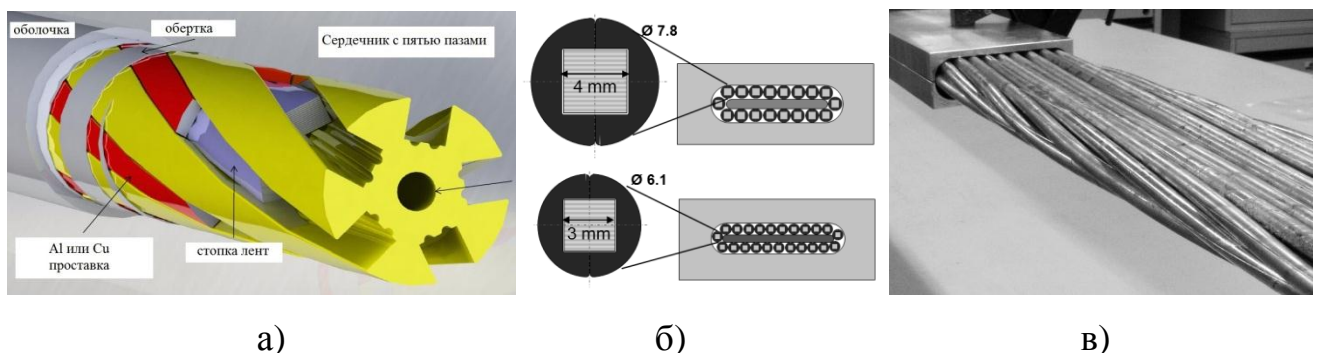


Рисунок 1.15 – Концепция ТНЭ от ENEA (Italian National agency for new technologies, Energy and sustainable economic development) [22] (а); концепция ТНЭ (б); прототип ТНЭ от EPFL-CRPP [23] (в)

ТНЭ, изображенный на рисунках 1.15 а и б, похож на Резерфордскую скрутку из стопок ВТСП лент в кондуитах.

Сечение изготовленного прототипа составляет 70x19 мм без учета кондуита, расчетный ток прототипа 50 кА. Шаг твиста такого ТНЭ составляет ~ 1000 мм. Плотность тока снижена за счет того, что каждая стопка лент находится в индивидуальном кондуите и в ТНЭ много пустот из-за укладки многих круглых проводников. По той же причине существует много мест концентрации механических напряжений, когда круглые проводники опираются друг на друга, а также на поверхности кондуита и формера. Охлаждение необходимо делать протоком хладагента через канал в общем кондуите, занятый скруткой из круглых проводников, из-за слабого теплового контакта круглых проводников с формером.

Кроме токамаков, важным классом УТС являются стеллараторы или геликоидальные машины. Конфигурация «тороидальной» обмотки геликоидального УТС приведена на рисунке 1.16 а. Сравнение параметров двух геликоидальных машин – действующего в Японии LHD с магнитной системой из НТСП и проектируемого там же FFHR с ВТСП магнитом приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Параметры геликоидальных УТС FFRH и LHD [24]

	FFHR-d1	LHD
Большой радиус, м	15,6	3,9
Тороидальное поле, Тл	4,7	3
Ток проводника, кА	94	13
Максимальное поле, Тл	12	6,9
Запасенная энергия, ГДж	160	0,9

Для FFHR разрабатывается ТНЭ 100 кА класса из ВТСП лент производства японской компании Fujikura, которая добилась в последние годы токнесущей способности около 1000 А на 10 мм ширины ленты в поле собственного тока при 77 К. Параметры ТНЭ, разрабатываемого для FFHR, приведены в таблице 1.3.

Сечение и габариты ТНЭ показаны на рисунке 1.16 б. Этот ТНЭ не является транспонированным, стопки лент не твистированы, что позволяет использовать полевую зависимость токонесущей способности при ориентации ВТСП лент параллельно полю. Компонента поля, перпендикулярная поверхности ВТСП лент, при такой конфигурации ТНЭ и обмотки мала по сравнению с максимальным полем на обмотке. При геликоидальной обмотке можно позволить себе применять не транспонированный ТНЭ, поскольку конфигурация обмотки сама по себе обеспечивает твистирование с шагом в несколько метров. Кроме того, следует обратить внимание на большое количество стабилизирующей меди в сечении ТНЭ.

Таблица 1.3 – Параметры токонесущего элемента для FFHR [24]

Рабочий ток	94 кА
Максимальное поле	12 Тл
Рабочая температура	20 К
Запас по температуре	~ 10 К
Метод охлаждения	Проточное принудительное газообразным гелием
Габариты	62 мм x 62 мм
Плотность тока	24,5 А/мм ²
Число ВТСП лент	40
Метод агрегатирования	Складывание в стопки
Стабилизатор	Бескислородная медь
Внешняя оболочка	Нержавеющая сталь
Изоляция	Внутренняя изоляция (без импрегнирования)

В настоящее время, пожалуй, единственным преимуществом ниобий-олова перед ВТСП в перспективных ТНЭ для токамаков остается стоимость, которая для ниобий-оловянного ТНЭ пока еще в несколько раз меньше, в расчете на метр на 100 кА. Сравнение стоимостей различных сверхпроводниковых материалов на

1 м 100 кА ТНЭ при температуре 5 К в поле 15 Тл приведено в таблице 1.4, [25]. Среди ВТСП по низкой стоимости лидируют производители 1-го поколения ВТСП, за ними идет SuNAM, поскольку эта корейская компания научилась делать дешевую ВТСП-2 ленту с высокими токами. Следует отметить, что при температуре 10-20 К и в полях порядка 20 Тл эта таблица выглядела бы совершенно по другому – без ниобий-олова, а на первое место скорее всего вышла бы ВТСП-2 лента, причем, SuperPower или Fujikura, из-за лучших полевых свойств.

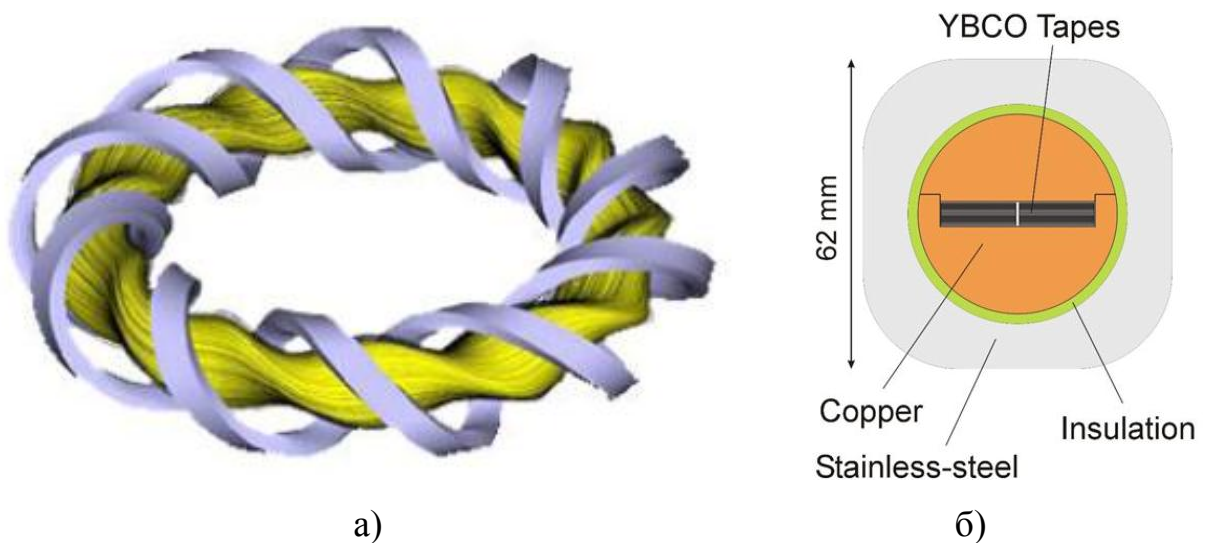


Рисунок 1.16 – Концепция геликоидальной машины [26] (а);

концепция токонесущего элемента на 100 кА из YBCO лент 15 мм ширины с током >900 А/см при 77К, разрабатывается для японской установки FFHR [24] (б)

Таблица 1.4 – Сравнение цен на токонесущие элементы* из ВТСП и ниобий-олова [23]

Nb ₃ Sn для DEMO	Nb ₃ Sn			300 А/мм ²	320 м	3500~5000
--------------------------------	--------------------	--	--	-----------------------	-------	-----------

Продолжение таблицы 4

Производитель		I_c при 77 К	I_c при 5 К, 15 Тл	J_c при 5К, 15 Тл	Длина ленты на 1 метр кабеля	Стоимость** ленты на 1 метр кабеля
Оксфорд, SWCC	Bi2212	-	350А	700 А/мм ²	280~500 м	5000~9000
Sumitomo	Bi2223	200 А	340 А	390 А/мм ²	300 м	12000
SuNAM	ReBCO	200 А	100 А	330 А/мм ²	750 м	15000
SuperPower	ReBCO	120 А	190 А	480 А/мм ²	520 м	33000
Fujikura	ReBCO	250 А	250 А	310 А/мм ²	400 м	40000

*количество проводника на 1 м кабеля с током 100 кА при 5 К, 15 Тл

**стоимость указана в швейцарских франках, в долларах США примерно в 2,5 раза меньше

Там же [25] далее заявлено, что, хотя пока еще цена не является преимуществом токонесущих ВТСП элементов (на порядок выше), по остальным параметрам ВТСП ТНЭ будут предпочтительнее.

Рассматривается цена перехода на ВТСП в масштабе крупного токамака. Общая стоимость проекта ITER оценивается приблизительно в 20 миллиардов евро. Длина токонесущего элемента в обмотках ITER – около 200 км, из них ~ 140 км в тороидальном магните и центральном соленоиде. Разницу в цене между ВТСП и НТСП токонесущим элементом в расчете на крупный токамак можно оценить как ~ 10 к\$ за метр, т.е. около 2 миллиардов долларов на ITER. Это на порядок меньше стоимости всего проекта в целом – много, но не катастрофично, особенно если такой ценой можно получить гарантированные более высокие рабочие параметры. За десять лет цена ВТСП за килоампер-метр может существенно (на порядок) снизиться.

Термоядерные электростанции – устройства относительно далекой (десятки лет) перспективы. Существует класс проектируемых термоядерных устройств, называемых гибриды. Они вырабатывают энергию в результате ядерной реакции, происходящей в blankets термоядерного реактора. Их основная задача – выработка ядерного топлива из элементов, запас которых на порядки больше, чем у применяющихся сейчас, и переработка ядерных отходов [26], [27]. В частности,

применение гибридеров позволит включить торий в топливный цикл ядерной энергетики. Термоядерная реакция в гибридерах происходит не для выработки энергии, она служит источником нейтронов для поддержания ядерной реакции в blankets. В настоящее время в России проектируется термоядерный источник нейтронов. Предполагается, что ток тороидальных обмоток должен составлять 20-25 кА в поле около 12 Тл при сечении ТНЭ в кондуите $\sim 25 \times 25$ мм [28]. Существует вероятность, что для таких параметров будет выбран токонесущий элемент из ВТСП для достижения рабочей плотности тока и стабильности в условиях радиационной тепловой нагрузки.

Кроме того, существует возможность создать ТИН сразу с полем на оси плазмы 9-10 Тл, что означает 18-20 Тл максимального поля на обмотке, которая тогда может быть ВТСП или комбинированной, с ВТСП частью, охлаждаемой жидким гелием, и повышающей поле с 9-10 до 18-20 Тл.

Тороидальный магнит токамака отличается от любых других магнитных систем прежде всего тем, что внутри него происходит термоядерная реакция с выделением огромных мощностей энергии. Нейтронная радиация, а также электромагнитное излучение не удерживаются магнитным полем и попадают непосредственно на стенки вакуумного сосуда.

За все время работы DEMO ожидаемая доза нейтронов составит $3-5 \cdot 10^{22}$ м⁻². Влияние нейтронной радиации на ВТСП магнитную систему токамаков описано в ряде работ, например, представлено в докладе [29]. Реакция дейтерий-третий ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} (3,5 \text{ MeV}) + n(14,1 \text{ MeV})$, в случае DEMO будет создавать поток энергии в 1 МВт/м² на внутренних стенках, и поток быстрых нейтронов с энергией около 14 МэВ. За blanketом и защитой, там, где находится магнитная система, плотность энергии нейтронов может быть примерно на 6 порядков меньше, и многие нейтроны становятся «тепловыми» (до 1 эВ) за счет рассеяния на материалах blanketа. Многие материалы, в частности, редкоземельные элементы, могут захватывать нейтроны, при этом происходят ядерные реакции, в которых выделяется большая энергия. Особенно, к сожалению, этим отличаются некоторые изотопы гадолиния, входящие в состав «природного» гадолиния в

большом количестве. Спектр нейтронов некоторых источников, в частности, спектр нейтронов на магнитной системе токамака, приведен на рисунке 1.17 а. На рисунке 1.17 б показана зависимость эффективного сечения захвата нейтронов от их энергии для иттрия и изотопов гадолиния, а также изотопный состав «природного» гадолиния. Для тепловых нейтронов эффективное сечение захвата гадолинием-155 и особенно гадолинием-157 на 5 порядков выше, чем у большинства элементов, в частности, иттрия. Это свойство гадолиния применяется в экранах для защиты от тепловых нейтронов.

Радиационная устойчивость GdBCO рассматривалась еще в 90-е годы, например, в работе [30] изучалось и сравнивалось воздействие на GdBCO тепловых и быстрых нейтронов. Облучение производилось в водяном канале реактора. Часть образцов защищалась от тепловых нейтронов кадмиевыми фильтрами. Было экспериментально показано, что разрушение сверхпроводимости в облученных образцах GdBCO на тепловых нейтронах происходит в 2,5 раза эффективней, чем на быстрых нейтронах. Объем несверхпроводящей области, связанный с захватом нейтрона ядром гадолиния, составляет около пяти элементарных ячеек.

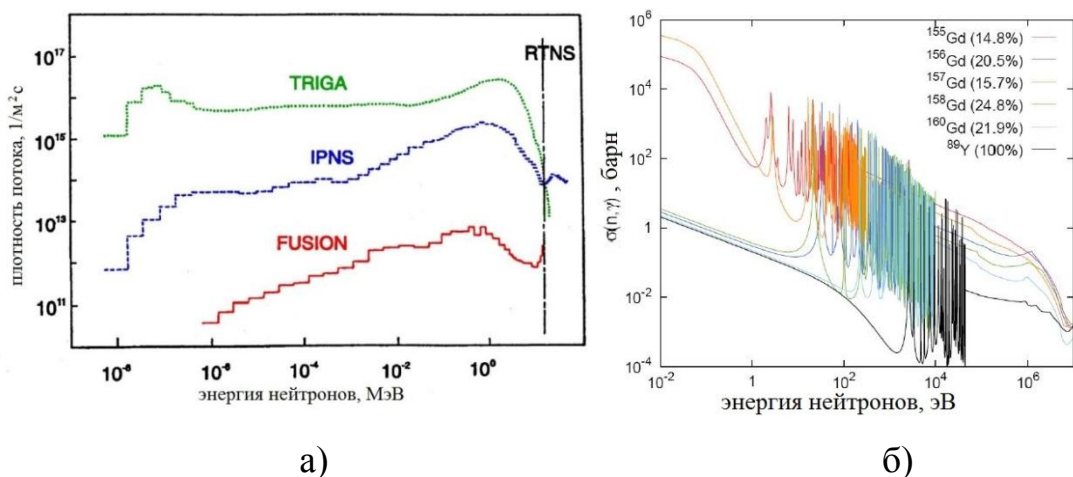


Рисунок 1.17 – Спектральная плотность потока нейтронов в реакторе TRIGA, на импульсном источнике нейтронов IPNS и за бланкетом термоядерных устройств (FUSION) (а); эффективное сечение захвата нейтронов изотопами гадолиния и иттрием, изотопный состав гадолиния [29] (б)

Реакция захвата теплового нейтрона гадолинием 157: $^{157}\text{Gd} + n \rightarrow ^{158}\text{Gd} + \gamma$ идет с выделением энергии 30 кэВ на атом в ВТСП слое и около 8 МэВ на обмотку в целом за счет гамма-излучения. Эта реакция создает не только дополнительную тепловую нагрузку, но и нарушает структуру сверхпроводника. После определенной дозы нейтронов начинается уменьшение критической температуры, наступает деградация ВТСП.

Необходимо выработать требования к запасу по току ТНЭ, радиационной устойчивости ВТСП лент и других материалам ТНЭ, а также к защите тороидального магнита, исходя из флюэнса и спектра нейтронов. Кроме того, следует учитывать тепловую радиационную нагрузку на ТНЭ при расчете его термодинамической стабильности.

В работе [31] рассматривается ядерная тепловая нагрузка для ITER. Ядерная тепловая нагрузка на тороидальные магниты ITER составит 300-400 кДж на цикл нагрева плазмы, в зависимости от режима. Это больше тепловыделения в соединениях и сопоставимо с энергией потерь в обмотках и теплопритоками [31]. К тому же ядерная тепловая нагрузка распределяется неравномерно, она больше всего на внутренних витках с максимальным магнитным полем в системе, поэтому преимущество ВТСП по запасу рабочей температуры очевидно и в данном контексте.

1.5 Магнитные системы космического применения

1.5.1 Плазменные двигатели

Во многих работах, например, в [32], представлены задачи для космических кораблей с ядерными силовыми установками и электрореактивными двигателями:

- освоение Луны;
- межпланетные пилотируемые экспедиции, в том числе к Марсу, астероидам и спутникам Юпитера с целью научных исследований и добычи полезных ископаемых;

- доставка грузов в дальний космос;
- противодействие астероидно-кометной опасности, мониторинг опасных объектов, доставка к ним отклоняющих устройств (зарядов);
- очистка космического пространства от техногенного мусора (импульсным лазером) и отработавших космических аппаратов;
- захоронение особо опасных радиоактивных отходов;
- буксировка спутников на высоких орбитах, корректировка орбит.

Схема транспортно-энергетического модуля (буксира) мегаваттного класса показана на рисунке 1.18, схема корабля с 24 МВт ядерным электрореактивным двигателем для пилотируемой экспедиции на Марс приведена на рисунке 1.19.

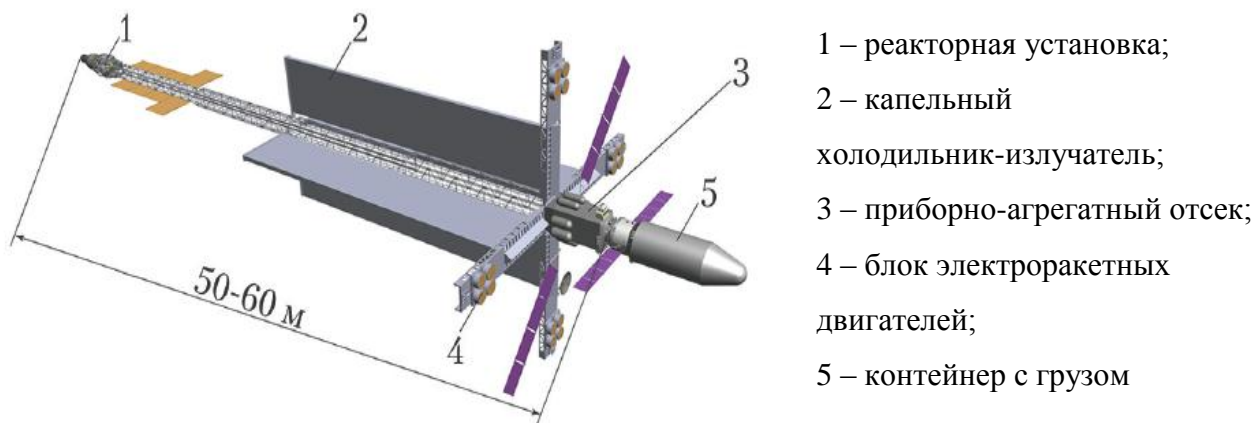


Рисунок 1.18 – Транспортно-энергетический модуль мегаваттной мощности на основе ЯЭУ с газотурбинной установкой

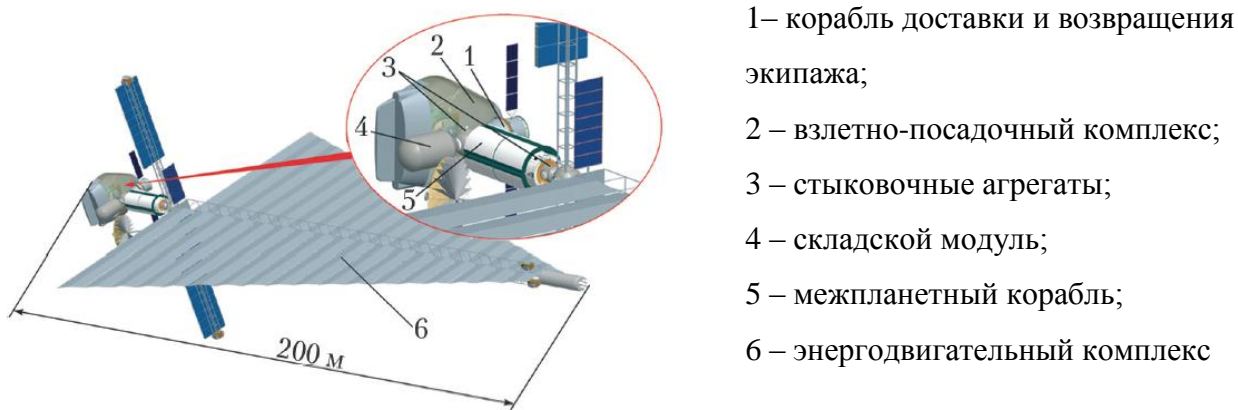


Рисунок 1.19 – Общий вид МЭК с ЯЭРДУ

Россия является лидером в области космической ядерной энергетики.

Электрореактивные двигатели также применяются в космосе уже десятки лет для коррекции орбит спутников, вывода аппаратов на высокие орбиты. Мощность этих двигателей составляет до десятков кВт, питание осуществляется от радиоизотопных источников и солнечных батарей. Удельный импульс на порядок выше, чем у химических двигателей, что позволяет экономить массу рабочего тела и совершать многократные маневры. Удельный импульс используемых в настоящее время электрореактивных двигателей ограничен напряжением разряда, а мощность, тяга и время непрерывной работы – ресурсом работы электродов. Тем не менее, даже применение подобных маломощных электрореактивных двигателей в составе модульной сборки, питаемой от ядерного реактора с электрической мощностью 1-20 МВт, позволит решать перечисленные выше задачи, как утверждают авторы работы [32].

Принципиально неустранимые недостатки современных электрореактивных двигателей в применении к мощным (1-200 МВт) двигательным установкам:

1. Мощность единичного модуля ограничена сотнями киловатт, десятки киловатт достигнуты на серийных двигателях, придется использовать многомодульные двигательные установки
2. Максимальный удельный импульс принципиально ограничен напряжением разряда в плазме, то есть температура рабочего тела не более десятков эВ (до миллиона К), и скорость космического аппарата не будет существенно выше, чем с химическим двигателем; либо скорость будет на порядок выше, но не получится экономии выводимой на орбиту массы
3. Ресурс работы из-за наличия контакта плазмы с электродами вряд ли будет существенно выше 10^3 часов, что недостаточно для дальних экспедиций и патрулирования, потребуется замена.

Альтернативой являются безэлектродные плазменные двигатели, использующие высокочастотные методы нагрева плазмы и магнитную

термоизоляцию, например, реализуемая в настоящее время схема VASIMR [33], [34], [35].

VASIMR (variable specific impulse magnetoplasma rocket) – электромагнитный плазменный ускоритель с изменяемым удельным импульсом. Примерная схема такого двигателя приведена на рисунке 1.20. Устройства, работающие по данной схеме, состоят из геликонной и ионно-циклотронной антенн и магнита, обеспечивающего изоляцию плазмы от стенок, ввод высокочастотной энергии в плазму, и перевод тепловой энергии плазмы в кинетическую энергию, создающую тягу. В область геликонного резонанса впрыскивается рабочее тело, ионизируется там, образовавшаяся плазма нагревается до рабочих температур ~ 1 МК и выше в области ионно-циклотронного резонанса (ИЦР). Затем в области магнитного сопла вращательное движение ионов переходит в поступательное, создавая тягу, с опорой на магнитное поле. На далеком расстоянии от сопла ускоренные ионы срываются с силовых линий магнитного поля. Управляя соотношением ВЧ мощностей в геликонной и ионно-циклотронной антеннах, можно менять удельный импульс рабочего тела и тягу. Чем выше доля геликонной мощности, тем больше количество плазмы и выше тяга. При повышении доли ионно-циклотронной мощности возрастает температура плазмы, скорость ионов, и, соответственно, удельный импульс. На рисунке 1.21 показана конструкция одного из первых прототипов VASIMR мощностью 50 кВт и профиль аксиального магнитного поля на центральной оси.

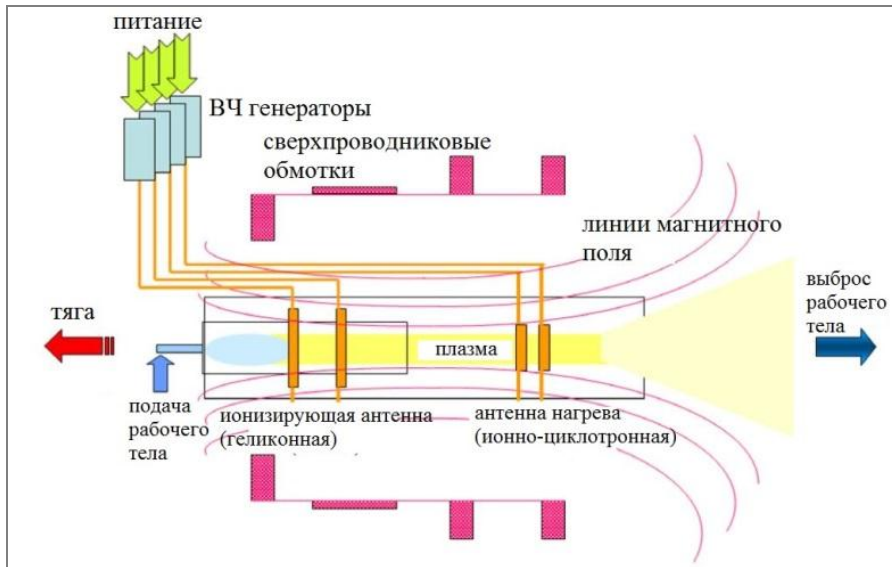


Рисунок 1.20 – Примерная схема VASIMR

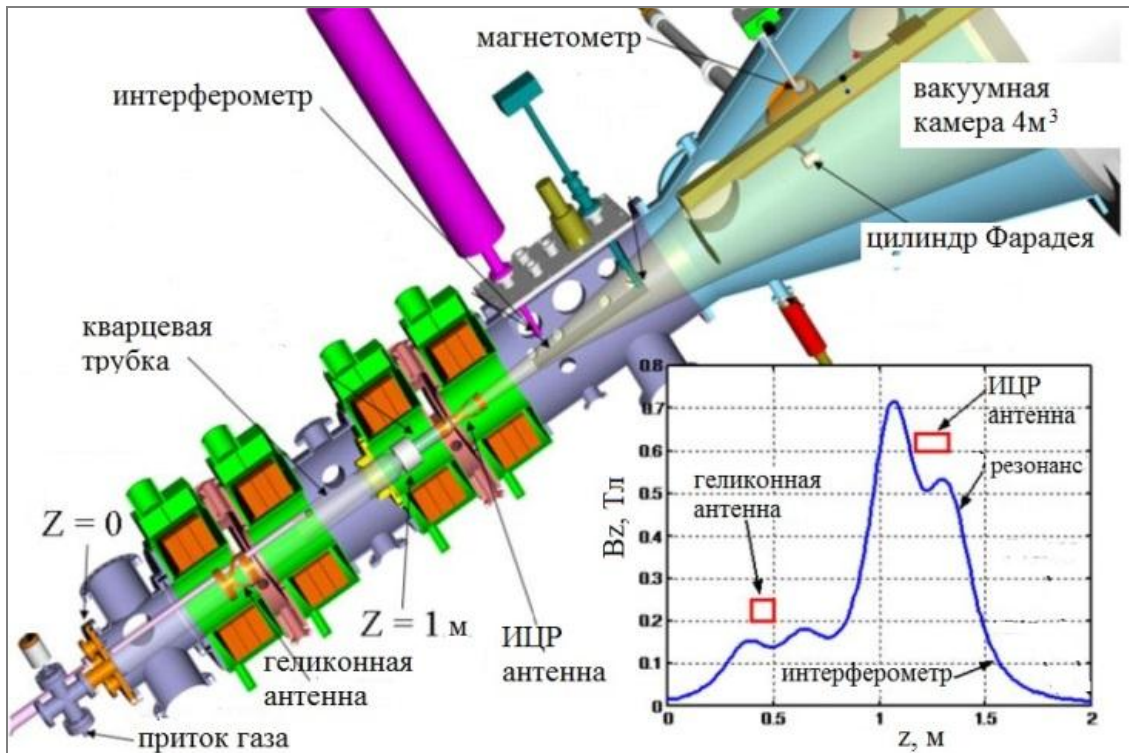


Рисунок 1.21 – Конструкция лабораторного прототипа VASIMR мощностью 50 кВт и распределение магнитного поля на оси этого прототипа [33]

Профиль магнитного поля примерно одинаков для подобных устройств. Величина максимального магнитного поля влияет на многие параметры двигателя. Наиболее важные параметры, определяемые величиной поля, это, во-первых, радиус плазменного шнура – он тем меньше, чем меньше ларморовский

радиус вращения ионов, то есть, чем выше поле. Кроме того, плотность энергии плазмы серьезно возрастает с увеличением амплитуды поля в области ионно-циклотронного резонанса, поэтому в мощных двигателях будет целесообразно поле в несколько Тл, от 2 Тл и больше, в зависимости от мощности двигателя. Такой стационарный магнит на космическом корабле может быть только сверхпроводниковым. На рисунке 1.22 изображен двигатель мощностью 200 кВт в наземном варианте внутри высоковакуумного испытательного стенда.

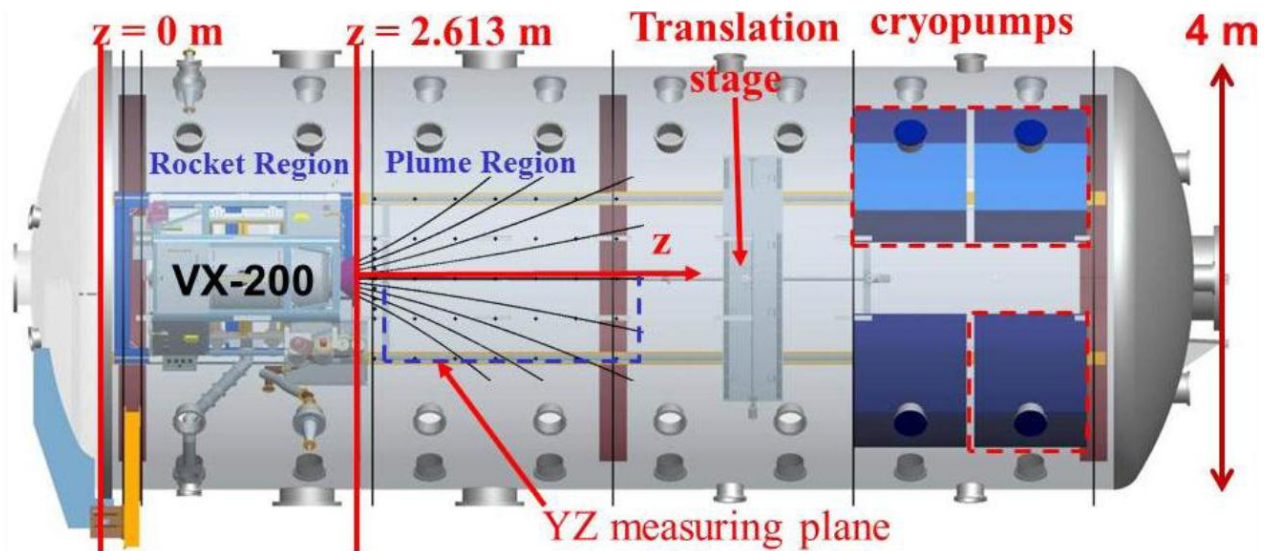
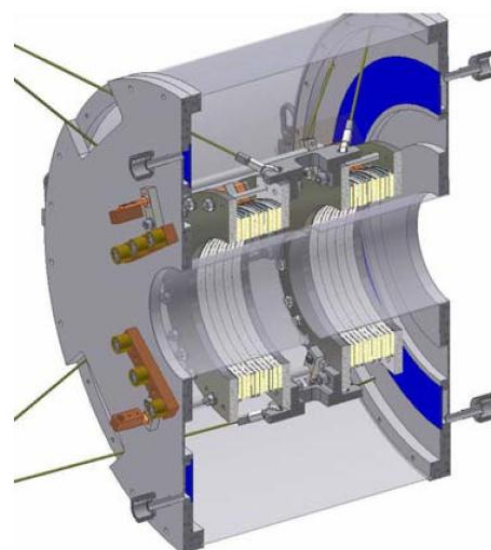
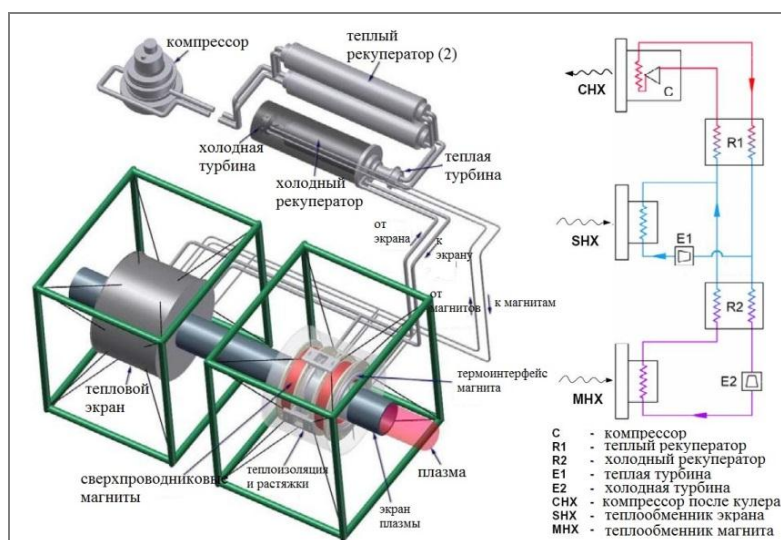


Рисунок 1.22 – Прототип VASIMR 200 кВт в испытательном стенде [35]

Работа плазменных двигателей с ИЦР нагревом требует вакуума 10^{-6} - 10^{-9} Торр. В космическом пространстве этой проблемы не существует. Для разработок и исследований необходимо проводить наземные испытания двигателей. Стенд для наземных испытаний представляет собой вакуумную емкость объемом десятки кубических метров с высокопроизводительными крионасосами. Двигатель, состоящий из двух 100 кВт модулей, испытан на таком стенде, планируется испытание его полетного варианта на Международной космической станции. Более мощные двигатели (1 МВт и выше) могут быть испытаны только в космическом пространстве, поэтому разработку технологии стоит проводить с использованием 100-300 МВт модулей, для которых еще рационально создание наземных испытательных стендов.

Магнитные системы модулей, описанных в работе [35], намотаны из ВТСП ленты 1-го поколения. Во время начала работ по VASIMR, в конце 90-х – начале 2000-х, производство ВТСП 2-го поколения было недостаточно развито. ВТСП необходимо применять в крупных магнитах на космических аппаратах из-за их более высоких, чем у НТСП, рабочих температур. Магниты, описанные в [34], [35], работают при температурах 35 К. В работе [34] описана система охлаждения магнитов VASIMR, их подвеска и тепловое экранирование. Температура экранов составляет 77 К. Температура, поддерживаемая системой охлаждения на борту космического корабля, составляет 300 К. Система охлаждения, тепловое экранирование и подвеска магнит VASIMR приведены на рисунке 1.23.



а)

б)

Рисунок 1.23 – Схема подвески, теплового экранирования и системы проточного охлаждения магнита VASIMR (а) схема двухступенчатого турбо-брайтоновского цикла охлаждения [34] (б)

Для охлаждения магнитов предлагается применять турбо-брайтоновские криокулеры, имеющие такие преимущества, как компактность и малый вес, длительный ресурс работы и низкий уровень вибрации. Охлаждение магнита и экрана проточное газообразным гелием.

Системы охлаждения, тепловых экранов, и подвески успешно прошли испытания в составе прототипа двигателя на наземном стенде. По критерию минимального веса магнитной системы вместе с оборудованием для поддержания рабочей температуры, ВТСП магнит с рабочей температурой 35 К с проточным охлаждением газообразным гелием от турбо-брайтоновского криокулера признан оптимальным для полетного варианта VASIMR мощностью 200 кВт.

Для магнитов из ВТСП-2, в целях оптимизации выводимого на орбиту веса, необходимо подбирать рабочую температуру, исходя из величины поля, мощности двигателя, свойств ВТСП проводника и параметров доступного оборудования для охлаждения.

В России ведутся исследования по магнитным плазменным ловушкам, результаты которых могут быть использованы для создания безэлектродного плазменного двигателя с магнитной термоизоляцией и высокочастотным нагревом плазмы [36].

1.5.2 Магнитное экранирование космических аппаратов от заряженных частиц

Единственным надежным способом защиты экипажа длительных пилотируемых экспедиций за пределы магнитосферы от космического излучения является магнитное экранирование, само по себе или в сочетании с защитой веществом [37]. Представляющее опасность космическое излучение состоит преимущественно из протонов солнечного или галактического происхождения. Рекомендуемые энергии отсечки спектра протонов защитой по различным источникам (и для различной длительности экспедиций, а также в зависимости от фазы солнечной активности), лежат в диапазоне до сотен МэВ [38], [39]. Размеры экранируемых частей космического аппарата составляют несколько метров. Предлагаемые в работах [37], [38] и [39] магнитные системы создают поля в несколько Тл на размерах также в несколько метров вокруг защищаемого отсека. При этом важным требованием к магнитной системе радиационной защиты

является поле внутри экранируемого объема – оно не должно превышать допустимой величины, порядка земного магнитного поля. Все это диктует требования к размерам, форме и параметрам магнитов. Форма контуров с током должна быть примерно такая, как показано на рисунке 1.24, или на рисунке 1.25 а. На рисунке 1.25 б показан тороидальный экранирующий магнит из 24 катушек типа «рейстрэк», который в работе [39] предлагается изготовить из сверхточного токонесящего элемента на основе диборида магния.

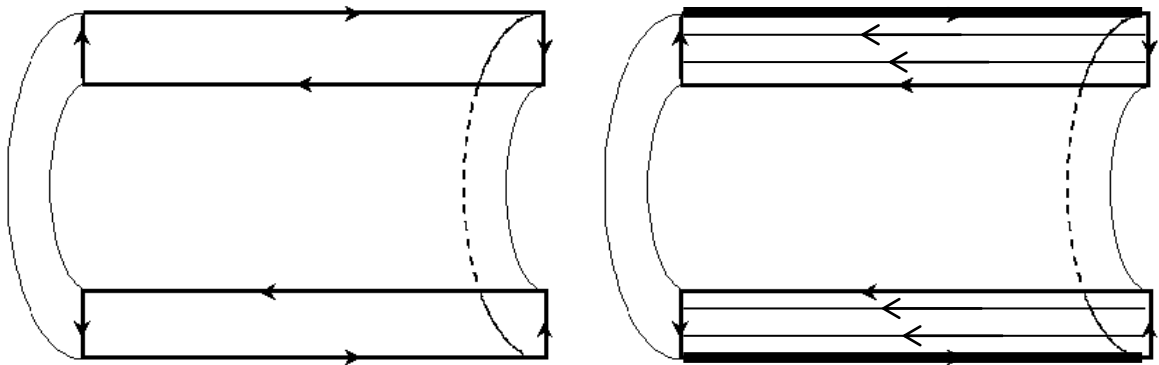


Рисунок 1.24 – Магнитная защита типа «коаксиал» в двух вариантах, предлагаемых в [37]

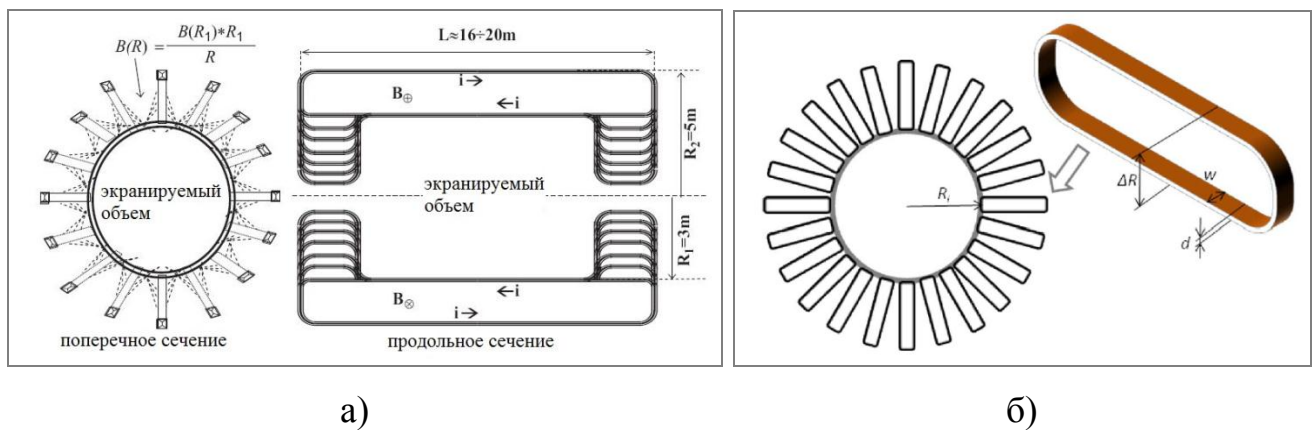


Рисунок 1.25 – Схема магнитной защиты с частичной защитой

торцов кабины [38] (а); сверхпроводниковый тороидальный магнит защиты из 24 катушек типа «рейстрэк», предлагаемый в работе [39] (б)

Поле на стенках экранируемой кабины составит всего 10 мТл, причем снизится до 1 мТл на расстоянии 0,2 м от стенки. Значения силы, изгибающей

траектории частиц, составляют в различных вариантах от 5,4 до 11,4 Тл·м, что соответствует энергиям отсечки 0,3-1 ГэВ. Максимальное поле на обмотке составляет 4 Тл. Предполагается, что такой магнит сможет работать при температуре 14 К при стабилизации температуры твердым водородом.

1.5.3 Создание искусственного земного магнитного поля

Длительное пребывание экипажа космических кораблей и персонала планетарных баз вне земной магнитосферы может вызвать нарушения здоровья и работоспособности [37]. Создание искусственной магнитосферы может оказаться необходимым для межпланетных экспедиций, патрулирования космического пространства и жизнеобеспечения баз на Луне и планетах со слабым магнитным полем (Марс, астероиды и т.д.). В [37] предложены способы создания магнитного поля на космических аппаратах и планетарных базах. На космических кораблях из-за их сравнительно небольших объемов создание таких малых полей, как земное, может быть осуществлено при помощи резистивных токопроводящих элементов с расходом электроэнергии всего в десятки ватт, поэтому необходимости в применении сверхпроводника нет. В случае создания искусственной магнитосферы на всей территории планетарной базы целесообразно применение систем Максвелла, Гельмгольца, Гаррета и др., с вертикальной или горизонтальной укладкой витков, как упомянуто в [37]. Тогда, в зависимости от размеров территории, может быть целесообразно использование ТНЭ из ВТСП, с проточным охлаждением жидким азотом.

1.6 Индуктивные накопители энергии

В настоящее время ведутся разработки и проектирование сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии (СПИН) из ВТСП для различных применений – энергетических, транспортных, военных. Значения запасенной энергии проектируемых СПИН лежат в диапазоне от 0,2 МДж до 2 ГДж класса [40], [41], [42].

Максимальное поле в некоторых осуществляемых уже сейчас проектах составляет свыше 20 Тл, например, в Брукхейвенской национальной лаборатории создается соленоид для СПИН с полем 25 Тл [43]. Эскиз этого магнита в разрезе, а также фотография в собранном виде представлены на рисунке 1.26. Данный магнит СПИН представляет собой соленоид, состоящий из 28 внутренних и 18 внешних двойных галет (из 12 мм ленты производства SuperPower). Секции магнита окружены бандажами из нержавеющей стали, поскольку механические напряжения достигают 400 МПа.

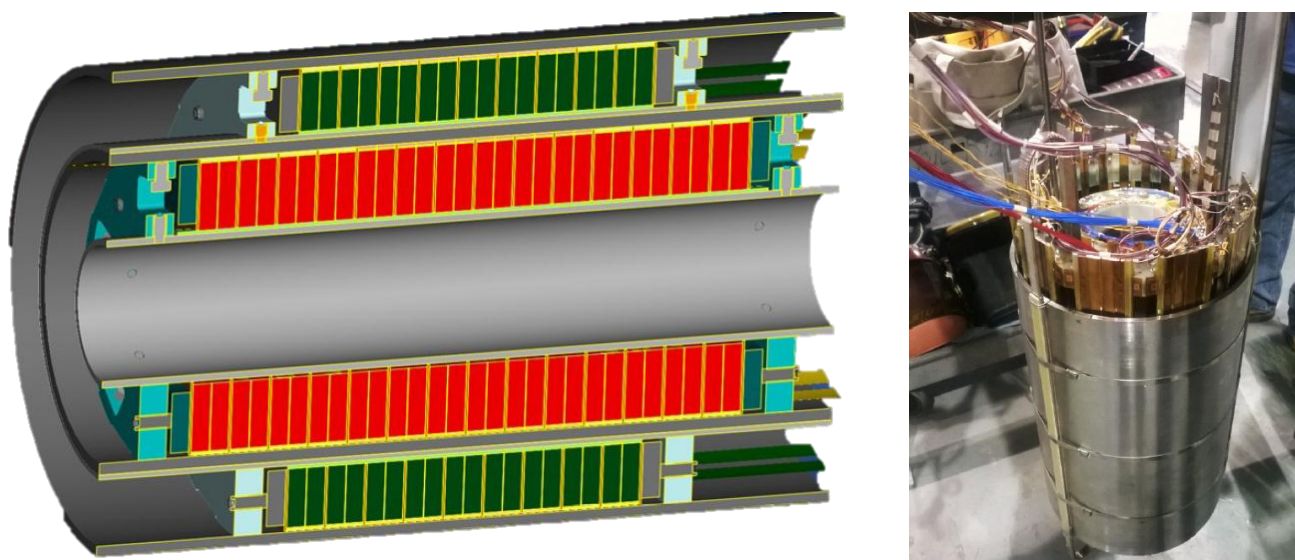


Рисунок 1.26 – ВТСП СПИН, изготавливаемый в Брукхейвенской национальной лаборатории [43]

Рабочая температура магнита 4 К, ток до 700 А, охлаждение погружное жидким гелием. Внутренний диаметр составляет 100 мм, внешний ~ 300 мм.

При индуктивности накопителя 7 Гн и максимальной запасенной энергии 1,7 МДж скорость заряда СПИН составляет 1,2 А/с. Вывод можно производить гораздо быстрее, и все равно уже для СПИН такой энергии для мощности нагрузки ~ 1МВт приходится брать 12 мм ленту в жидком гелии, чтобы обеспечить силу тока и снизить напряжение при выводе энергии.

Ранее в лаборатории в рамках тематики высокополевых ВТСП-2 СПИН были изготовлены накопитель из 12 галет с полем 11,4 Тл при 4 К, а также накопитель из 46 галет с полем 12,5 Тл при температуре 27 К, уже допускающей охлаждение жидким неоном.

В докладах [40], [41] рассказывается о серии накопителей энергии, планируемой к разработке в США для нужд авиации и космических аппаратов в военных целях. Показано, что ВТСП СПИН целесообразны в данных случаях из-за сочетания высокой удельной энергии и удельной мощности. Рассматриваются СПИН импульсного применения, магниты во всех случаях тороидальные из требований по минимизации рассеянного магнитного поля на самолетах и космических аппаратах. По ближайшим перспективам применения и запасенным энергиям до ~ 50 МДж стоит упомянуть питание боевых лазеров. В далекой перспективе около 2030 года заявлено возможным включение СПИН в систему питания электрического самолета.

Из крупных проектируемых систем для компенсации колебаний нагрузки энергосетей стоит упомянуть японский проект тороидального СПИН 2 ГДж класса [42], [44]. Схема этого СПИН и его сверхпроводящей части показана на рисунке 27. Внешний диаметр тора ~ 10 м.

Магнит СПИН будет состоять из 36 секций, каждая секция запитана от отдельного силового модуля. Охлаждение каждой группы ВТСП токовводов и частей экрана производится независимо индивидуальным криокулером, контактным способом. Так же охлаждаются секции магнита, по два кулера на 3 секции. Всего планируется 24 криокулеров мощностью 50 Вт на рабочую

температуру 20 К и 36 криокулеров на температуру экрана ~ 77 К. Секции планируется наматывать стопками по 4 12 мм ВТСП ленты, места для каналов охлаждения нигде не предусмотрено, предполагается, видимо, такой запас по температуре, что контактное охлаждение справится с потерями при вводе и выводе энергии. Параллельное питание секций и вывод энергии создает повышенные требования по синхронизации силовых модулей секций, ведь при несимметричном вводе и выводе тока в такой магнит могут возникнуть ponderomotive силы, превышающие прочность конструкции. Кроме того, появится составляющая поля, перпендикулярная ленте, которая вызовет переход в нормальное состояние катушек с большей величиной тока.

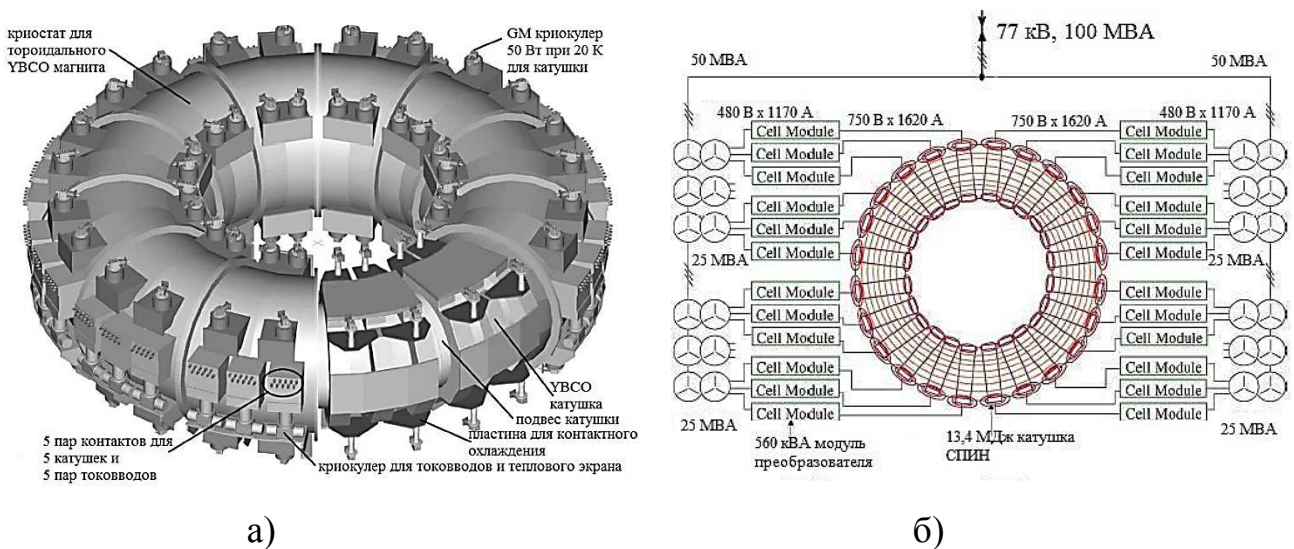


Рисунок 1.27 – Схема магнита, криостата и системы охлаждения 2,4 ГДж 100 МВА СПИН (а); система преобразования тока 2 ГДж 100 МВА СПИН [42] (б)

В мощных и импульсных накопителях обосновано и часто необходимо применение сильноточных ТНЭ. В докладе [45] рассказывается о возможностях применения CORCC в авиации в качестве ТНЭ для СПИН и гибких линий питания. Подчеркиваются преимущества CORCC перед единичной лентой в СПИН: мощность при низком напряжении, снижение потерь, компенсация неоднородности критического тока единичной ленты.

1.7 Ускорители частиц

Высокополевые магниты из ВТСП или вставки из ВТСП в НТСП дипольные магниты будут применяться при создании новых ускорителей во многих научных центрах. В качестве примера можно привести планы по созданию коллайдеров, описанные в докладе [46]. В докладе предлагается апгрейд Большого адронного коллайдера (БАК) до энергии 33 ТэВ при помощи 20 Тл диполей, кроме того, предполагается строить новое 80 км кольцо, которое с 20 Тл диполями сможет разгонять частицы до 100 ТэВ.

Еще одно применение ВТСП ТНЭ на ускорителях частиц – это токоподводы для питания магнитов, причем токоподводы могут работать при температурах выше жидкого гелия. Для апгрейда БАК считается необходимым перенести источники питания магнитов из подземных помещений на поверхность. В работе [47] предлагаются проложить линии питания из ТНЭ на основе высокотемпературных сверхпроводников – дигборида магния, ВТСП лент 1-го и 2-го поколения. Общая длина линий питания составит около 1000 км, а величина тока будет лежать в диапазоне 1-150 кА, рабочие температуры – в диапазоне 10-77 К.

1.8 Индуктивные СОТ

Данная часть литературного обзора посвящена разработке и изготовлению сверхпроводникового ограничителя тока (СОТ) с насыщенным магнитопроводом для сетей 220 кВ. Принцип работы СОТ индуктивного типа основан на использовании нелинейности намагниченности магнитопровода в случае резкого увеличения индуктивного сопротивления при коротком замыкании (КЗ).

Ток сети протекает по обычным резистивным обмоткам, находящимся на магнитопроводе. Возможно несколько различных схем индуктивных СОТ:

- трансформаторная схема (активно разрабатывается компанией Bruker);
- СОТ с ВТСП экраном;

- СОТ с насыщенным магнитопроводом.

Для СОТ трансформаторного типа и СОТ с ВТСП экраном переход сверхпроводящих элементов в нормальное состояние вызывает увеличение импеданса размещенных на магнитопроводе обычных обмоток. В токоограничителях с насыщенным магнитопроводом переход ВТСП проводника в нормальное состояние не используется, и вполне возможна их реализация на основе обычных электротехнических материалов. ВТСП обмотки необходимы лишь для сокращения массогабаритных характеристик и уменьшения потерь энергии. Отличительной особенностью всех видов индуктивных СОТ является значительно меньший расход ВТСП проводника по сравнению с резистивными СОТ с аналогичными параметрами. Несмотря на более высокий импеданс в номинальном режиме работы и меньшую глубину ограничения тока короткого замыкания, в ряде случаев (напряжение выше ~ 35 кВ) индуктивные СОТ оказываются более выгодными по сравнению с резистивными. Схема одной фазы индуктивного СОТ с насыщенным магнитопроводом [48] показана на рисунке 1.28 а, эскиз 3-х фазного СОТ – на рисунке 1.28 б.

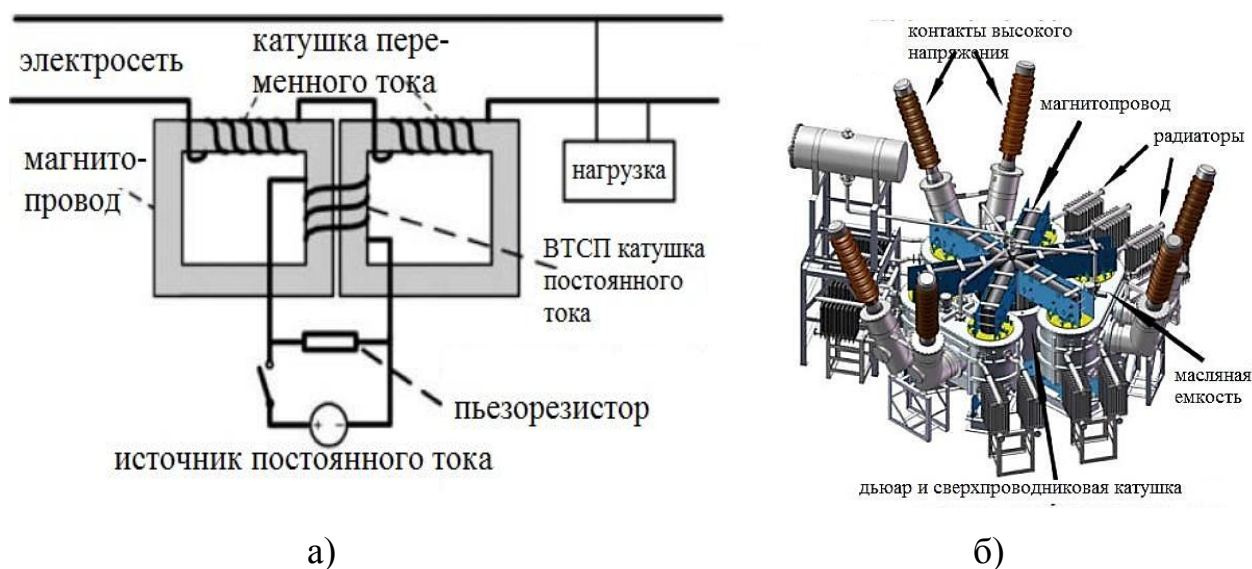


Рисунок 1.28 – Схема одной фазы индуктивного СОТ [48] (а);
схематическое изображение 3-х фазного токоограничителя с насыщенным
магнитопроводом на 220 кВ [49] (б)

Параметры устройства: вес - 120 тонн, габаритные размеры - $8 \times 8 \times 9$ м. При рабочем напряжении 220 кВ номинальный ток СОР составляет 800 А. Ограничение тока КЗ довольно слабое: с 50 кА ток ограничивается до 30 кА. Основные характеристики СОР с насыщенным магнитопроводом приведены в таблице 1.5.

СОР состоит из шести магнитопроводов, по два на каждую из фаз, и из шести обычных обмоток переменного тока. ВТСП подмагничивающая галетная обмотка постоянного тока охватывает все магнитопроводы и в рабочем режиме их насыщает. Благодаря этому, импеданс основных обмоток в номинальном режиме является малой величиной. В состав СОР также входит источник питания постоянного тока ВТСП катушки подмагничивания на модулях IGBT и система быстрого разряда, которая состоит из нагрузочных резисторов и выключателя.

Таблица 1.5 – Основные характеристики СОР с насыщенным магнитопроводом

Номинальное напряжение, кВ	220
Номинальный ток, А	800
Частота, Гц	50
Номинальное падение напряжения	<1.25%
Максимальный ток КЗ, кА	50
Максимальный ограниченный ток, кА	30
Время восстановления подмагничивания, с	<0,5
Общий вес, тонн	120
Габариты (длина x ширина x высота), м	8x8x9

При коротком замыкании ток КЗ попеременно выводит из насыщения то один, то другой магнитопровод, из-за чего индуктивное сопротивление увеличивается, а ток ограничивается. Затем срабатывает система быстрого разряда, которая выводит ток из ВТСП катушки подмагничивания. Все магнитопроводы оказываются в ненасыщенном состоянии, индуктивность основных обмоток возрастает, ток КЗ ограничивается еще глубже. После КЗ система питания вновь вводит ток в ВТСП катушку подмагничивания, индуктивное сопротивление падает. Разряд ВТСП катушки подмагничивания

должен происходить примерно за 5 мс, а восстановление подмагничивания – менее чем за 0,5 сек. Катушка подмагничивания состоит из галет, намотанных из ВТСП 1-го поколения на основе Bi-2223, которые соединены последовательно в несколько секций, которые, в свою очередь, соединены параллельно. И в эти параллельные магнитные системы осуществляется столь быстрый ввод тока и еще более быстрый разряд! Размеры ВТСП катушки подмагничивания: диаметр около 2 метров, высота примерно метр. Индуктивность такой катушки, расположенной на магнитопроводах, составляет сотни Гн.

Рассмотрим, с какими проблемами и недостатками данной конструкции пришлось столкнуться создателям СОТ. В основном, это уже пройденные многими другими разработчиками проблемы, хотя и не в масштабах устройства на 220 кВ.

Во-первых, принципиальным недостатком данной конструкции СОТ являются малая глубина токоограничения: с 50 кА всего до 30 кА и огромный объем железа, необходимый для работы устройства. При использовании меньшего количества железа произойдет насыщение магнитопровода во время КЗ, и устройство не сработает как ограничитель тока. Для увеличения глубины токоограничения и уменьшения массы и объема магнитопровода в 2005 г. в НИЦ «Курчатовский институт» предложена и запатентована схема токоограничителя с насыщенным магнитопроводом [50], содержащая дополнительные размагничивающие обмотки. В НИИЭФА предложена схема индуктивного СОТ с насыщенным магнитопроводом и методика расчета [51]. Компании Zenergy с 2007 г. по 2011 г. удалось добиться значительных успехов в оптимизации конструкции магнитопроводов и обмоток подмагничивания, что позволило существенно сократить масс-габаритные показатели ВТСП токоограничителей с насыщенным магнитопроводом. Однако, затем в Zenergy было признано неэффективным использование ВТСП обмоток в устройствах с рабочим напряжением ниже 110 кВ, и все дальнейшие работы продолжались уже без использования сверхпроводимости. Главная проблема, о которой сообщают сами разработчики [49], состоит в том, что ВТСП катушка повреждается во время КЗ из-за

возникающих в ней перенапряжений в процессе быстрого разряда (рисунок 1.29). Повреждения связаны как с огромной индуктивностью катушки, так и с плохой устойчивостью ВТСП ленты и не оптимальной для данного применения конструкцией обмотки. При КЗ возникает также ударная механическая нагрузка на обмотку, вызываемая силой Лоренца.

Применение сильноточного транспонированного ТНЭ из-за его устойчивости и снижения индуктивности обмотки подмагничивания могло бы решить проблему повреждений.



Рисунок 1.29 – Различные повреждения ВТСП обмотки в результате КЗ

1.9 Резистивные СОТ

Применение СОТ резистивного типа целесообразно в распределительных сетях с меньшим напряжением, чем индуктивные СОТ. Они, однако, обеспечивают большую глубину токоограничения, чем СОТ индуктивного типа, а в сетях постоянного тока вообще не имеют альтернативы. СОТ ограничивают ток КЗ за счет ВАХ ТНЭ, вызывающей значительное падение напряжения на ВТСП ТНЭ при токе, превышающем критический ток ТНЭ. Из недостатков резистивного ВТСП СОТ основным является значительное (пропорциональное напряжению сети) количество дорогостоящей ВТСП ленты, необходимое для ограничения тока. Напряжение, падающее на ТНЭ, определяется максимальной

температурой ТНЭ при КЗ, а она, в свою очередь, определяется длительностью КЗ и временем, отводимым на восстановление рабочей температуры. Распространены проекты и их реализации так называемых комбинированных резистивных СОР [52], [53], в которых при КЗ сверхпроводниковая часть ограничивает ток только в первые 10-30 миллисекунд, а затем быстродействующий выключатель, срабатывающий от напряжения на ВТСП ТНЭ, либо разрывает цепь, либо переключает на байпас. На байпасе может находиться индуктивный или резистивный ограничитель тока (реактор), который в рабочем режиме комбинированного СОР потреблял бы активную мощность или на нем происходило бы индуктивное падение напряжения, поэтому его можно включать только на несколько секунд КЗ. Комбинированная схема позволяет существенно экономить на количестве ВТСП ленты, поскольку время нагрева снижается с принципиально неограниченного времени КЗ до 10-100 мс срабатывания выключателя. Используется преимущество ВТСП СОР, состоящее в глубоком ограничении тока первой полуволны при КЗ. Обратное переключение происходит после восстановления рабочей температуры СОР, и это позволяет избежать перегрева и деградации ВТСП при слишком большой длительности КЗ, ведь если КЗ не завершилось, СОР просто сработает еще раз после повторного включения.

Из соображений минимального падения как активного, так и реактивного напряжения в режиме номинального тока, резистивный СОР должен иметь минимальное сопротивление токовых терминалов и контактов и минимальную индуктивность. Существует множество вариантов конструкций резистивных СОР. Используются разнообразные варианты бифилярных контуров из ТНЭ и единичных лент. В докладе [54] представлена конструкция СОР, показанная на рисунке 1.30.

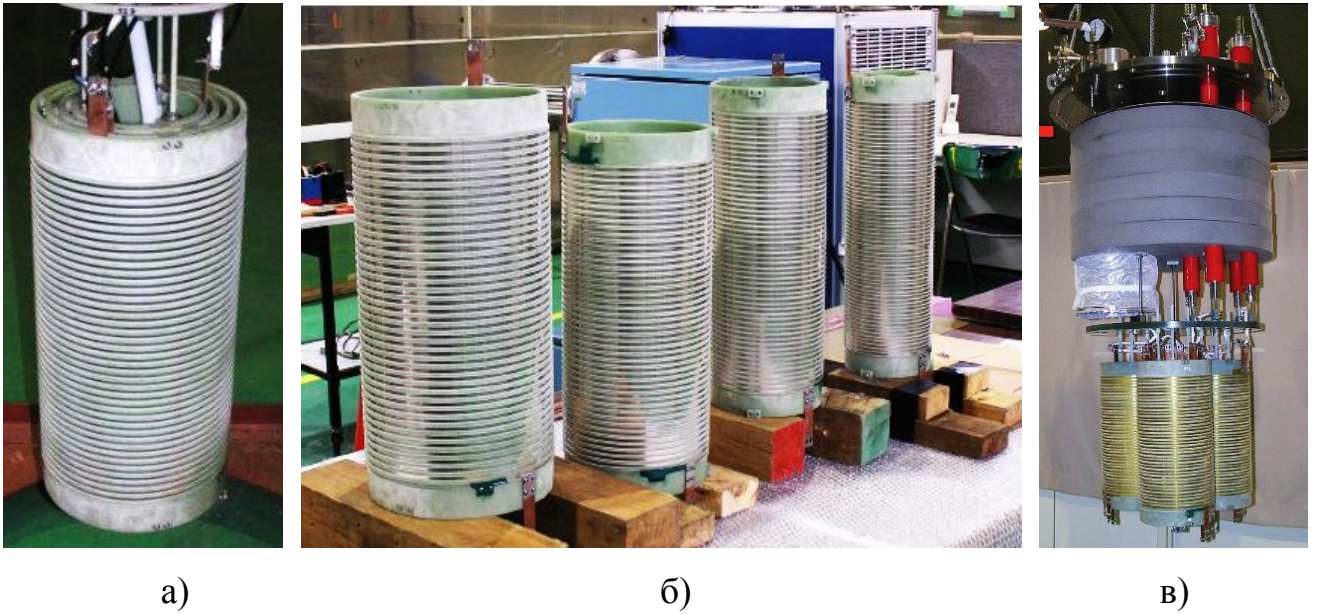


Рисунок 1.30 – Конструкция СОР из встречно включенных коаксиальных катушек(а); отдельные катушки (б); 3-х фазный СОР [54] (в)

В работе [55] представлены конструкции СОР с плоскими модулями, работающими при температуре 70 К и охлаждаемыми жидким азотом с пониженным давлением (Рисунке 1.31).

Конструкция модуля СОР в виде бифилярной галеты, представленная в работе [56], приведена на рисунке 1.32 а. Типичная для модуля резистивного СОР временная зависимость тока и напряжения при КЗ представлена на рисунке 1.32 б.

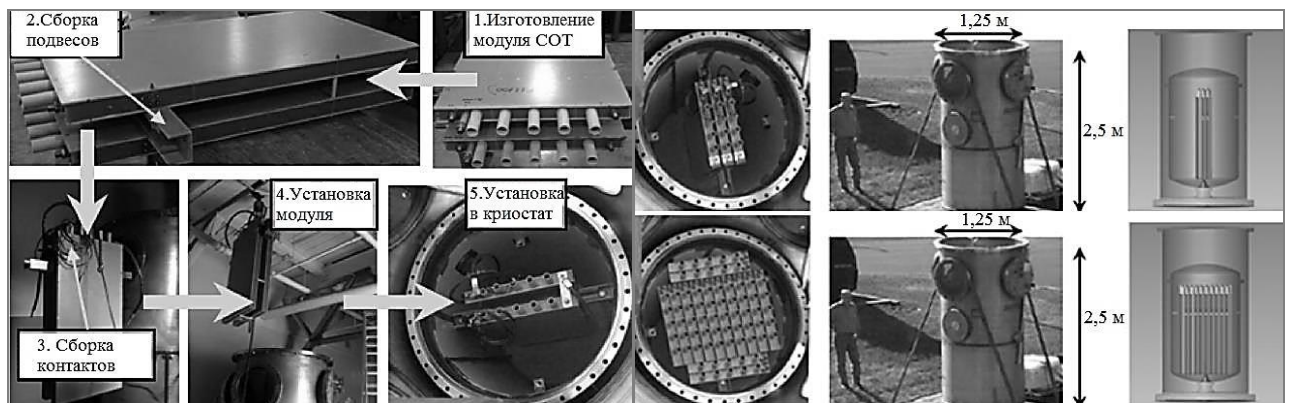
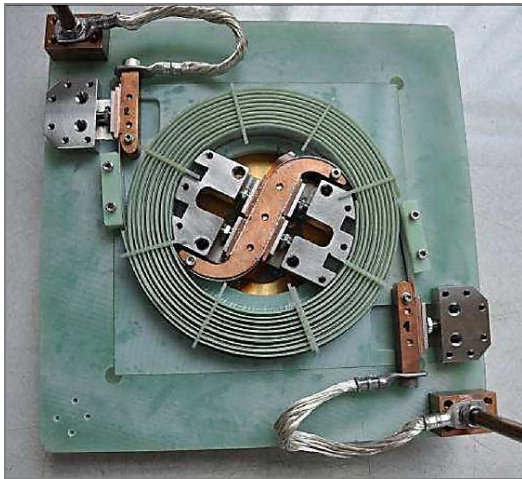
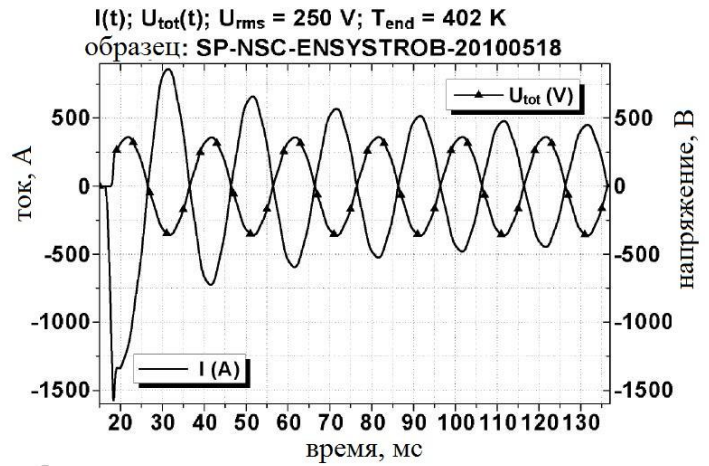


Рисунок 1.31 – Конструкции плоских модулей и различных СОР из них, представленные в [55]



а)



б)

Рисунок 1.32 –Модуль COT в виде бифилярной галеты (а); типичный график ограничения тока резистивным COT [56] (б)

В настоящее время по всему миру большое число прототипов резистивных COT было изготовлено и испытано в тестовых и коммерческих распределительных сетях. Это и проект ENSISTROB [56], и COT, установленные в тестовых электросетях компании KEPCO [57], и американские COT, и многие другие, например, [58] и [59].

1.10 Расчетные и экспериментальные исследования стабильности сверхпроводников при тепловых возмущениях

Во всех вышеперечисленных применениях ВТСП актуальны такие вопросы, как тепловая стабилизация сверхпроводников, устойчивость к тепловым возмущениям различной природы и защита сверхпроводников от перехода в резистивное состояние, а также от сгорания при переходе. Так, в работе [60] этим вопросам посвящены главы 5-9. В книге [61] рассматриваются вопросы возникновения и развития неустойчивостей, распространения нормальной зоны в композитных низкотемпературных сверхпроводниках, выводятся аналитические выражения для данных процессов и критерии стабильности. Рассматривается влияние механических напряжений и деформации сверхпроводников на

устойчивость сверхпроводящего состояния в магнитных системах. Деформация влияет как на ВАХ сверхпроводящих проводов, так и на возникновение тепловых возмущений (трещины, внутреннее трение) и скачков потока при подвижках проводов в магнитном поле.

Тепловые и электрофизические процессы в ВТСП рассматриваются в большом количестве работ, например, [62-71]. В [62] приведено одно из первых экспериментальных и расчетных исследований теплового перехода и восстановления ВТСП ленты 2-го поколения. Для расчета используется уравнение баланса мощностей и степенная ВАХ, а в экспериментах переход вызывается сверхкритическими импульсами тока. В работе [64] рассматриваются основные сходства и отличия тепловых процессов в ВТСП магнитах и НТСП магнитах, и предлагаются подходы к моделированию тепловых процессов, основанные на особенностях ВТСП. Тепловые переходы при вводе тока в ВТСП 1-го поколения при различных температурах рассматриваются в [63]. В [65] показаны механизмы развития неустойчивостей в ВТСП с учетом охлаждения жидкими хладагентами, в частности, возникновение неустойчивости при смене режима кипения, в особенности при охлаждении жидким гелием. Вопросы устойчивости на переменном токе рассматриваются также в ряде работ различных авторов, например, в работе [66], где показаны, в том числе, механизмы «накопления» критической энергии на многих циклах тока с амплитудой выше «критического». При этом «критические» амплитуды тока выше, чем на постоянном токе, из-за того, что охлаждение происходит постоянно, а разогрев – лишь часть цикла.

Методики экспериментального исследования стабильности ВТСП можно условно разделить на 2 класса – с внешними тепловыми возмущениями и с внутренним нагревом при помощи сверхкритического тока. Пример экспериментальной и расчетной работы с изучением действия внешнего возмущения – [67], где стопка из трех ВТСП-2 лент с током подвергалась импульсному нагреву в адиабатическом режиме при помощи внешнего нагревателя. Распределение температуры по длине стопки лент, по ее сечению и их зависимость от времени рассчитывалась в пакете COMSOL. Измерялись

напряженность электрического поля на образце, и температура – напротив нагревателя, а также по обе стороны от нагреваемой области. Все это позволяло измерить распространение резистивной зоны и критические энергии в стопках ВТСП-2 лент производства компаний SuperPower, SuNAM и AMSC.

Импульсный нагрев ВТСП лент током, превышающим критический, позволяет моделировать условия работы токоограничителей, и, во многих случаях, хорошо моделирует тепловые возмущения, возникающие внутри ТНЭ магнитов. Так, термоэлектрическая нестабильность, возникающая под действием единичных импульсов тока (а также на переменном токе), рассматривается и исследуется экспериментально в работе [68]. Измерены критические условия теплового перехода, отмечено и объяснено «накопление энергии возмущения» на переменном токе. В работе [69] уделено внимание также влиянию охлаждения жидким азотом на стабильность ВТСП лент, находящихся под влиянием импульсного тока. Влияние неоднородности токонесущей способности по длине ВТСП ленты на тепловой переход изучается в работе [70], где объяснено сгорание ленты на так называемых «горячих пятнах» - участках с локальным снижением токонесущей способности. Показана применимость уравнения теплового баланса в одномерном приближении (однородное распределение энергии по сечению ленты) для расчетов перехода ВТСП-2 лент в резистивное состояние. Также отмечена низкая (на 2-3 порядка ниже, чем у НТСП) скорость распространения нормальной зоны (резистивного состояния) у ВТСП лент, охлаждаемых жидким азотом. Экспериментальные и расчетные исследования ВТСП лент со сверхтоком в жидком азоте описаны также в работе [71].

Обобщая современные работы по тепловым процессам, стабильности, методам охлаждения и защиты от перехода и при переходе ВТСП магнитов, можно выделить основные тенденции при их моделировании:

- использование реальных вольтамперных характеристик, без условного разделения на «сверхпроводящее» и «резистивное» состояния
- уход от «критериев» к численным расчетам, или аналитическим моделям, позволяющим получить параметры перехода данного конкретного устройства.

Кроме того, особенности ВТСП, требующие повышенного внимания при разработке токонесущих элементов для магнитов и электроэнергетических устройств, заключаются в следующем:

- значительно большая тепловая стабильность ТНЭ и устройств из ВТСП, чем из НТСП, даже при гелиевых, а особенно при промежуточных и азотных рабочих температурах, при этом сильно зависящая от охлаждения

- тепловой срыв в ВТСП устройствах часто происходит локально, в так называемых «горячих пятнах», обусловленных неоднородностями токонесущей способности ВТСП, распределения магнитного поля, охлаждения или тепловыделения (теплопритока)

- «горячее пятно» увеличивается медленно, при достижении значительной температуры, что создает опасность повреждения устройств и дополнительные требования по их защите.

2 РАЗРАБОТКА СОТ РЕЗИСТИВНОГО ТИПА И ТНЭ ДЛЯ НИХ

2.1 Постановка задач для разрабатываемых СОТ

Для распределительных сетей, особенно железнодорожных, актуальна проблема защиты от коротких замыканий, вызывающих быстрый износ и повреждение оборудования. Статистические исследования показали, что короткие замыкания в несколько раз чаще происходят в энергосетях железных дорог, чем в обычных распределительных сетях. Допустимое время восстановления после замыкания может быть достаточно большим (несколько секунд) по сравнению с 0,1 с в обычной распределительной сети. Наиболее эффективная защита от короткого замыкания, учитывая время ограничения тока (на первой полуволне) и потери в рабочем режиме – сверхпроводящий токоограничитель (СОТ). Это утверждение справедливо и в сетях постоянного тока, где ограничение тока в первые 5-10 мс столь же важно.

Были выработаны технические требования для СОТ резистивного типа 3,5 кВ, 250 А действующего значения и 27,5 кВ, 900 А действующего значения, предназначенные для применения в распределительных сетях РЖД. Все конструкции СОТ содержат токонесущие элементы с параллельно соединенными ВТСП лентами. Учитывая особенности работы СОТ (низкие поля собственного тока), применена наиболее простая конструкция из параллельных не транспонированных лент. Исходя из соображений габаритов устройства, ВТСП ленты располагаются в 2 слоя. Для токонесущего элемента применен проводник Super Power SF12100, 12 мм лента с 1 мкм YBCO, без стабилизирующей меди, на основе которого необходимо было разработать токовые элементы на ток до 250А и до 900А действующего значения в рабочем режиме. Примеры номинального режима работы устройств представлены на рисунке 2.1.

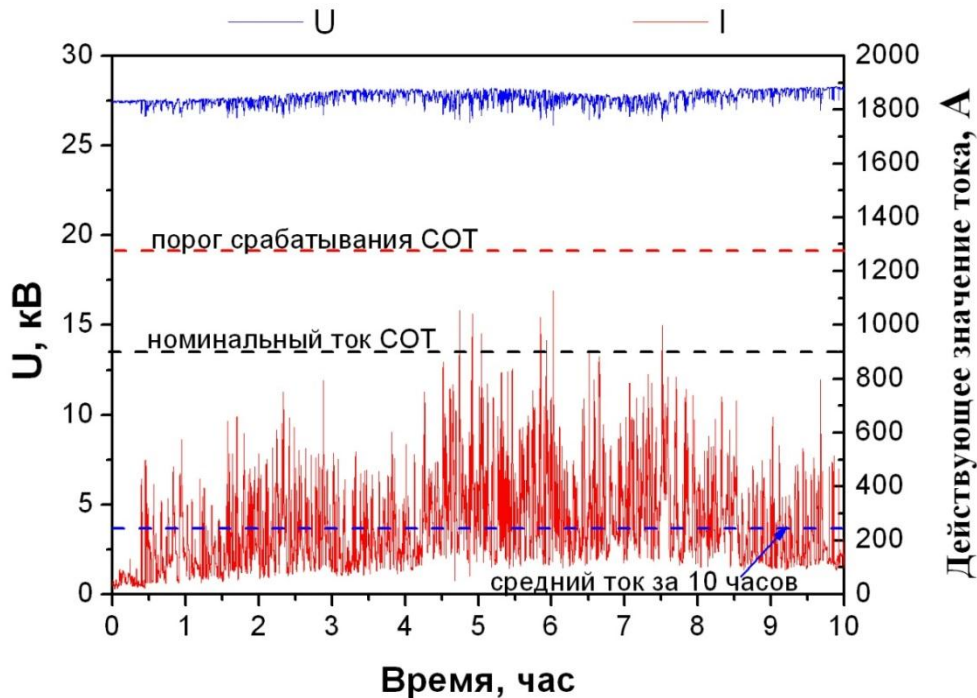


Рисунок 2.1 – Временные зависимости тока и напряжения на фидере контактной сети подстанции РЖД за 10 часов

2.2 Анализ проблем, возникающих при разработке СОТ, и путей их решения

1. Токонесущая способность ленты современной SF12100 колеблется от 300 до 400 А (от 210 до 300 А по состоянию на 2009 год, когда были начаты данные работы), поэтому необходимо использовать несколько параллельных лент, в данном случае до 6, и обеспечить распределение токов соответственно токонесущей способности лент. На постоянном токе «равномерность» распределения определяется качеством (однородностью) токовых терминалов, а на переменном токе – индуктивностью лент на низком уровне ВАХ, а также ВАХ лент – на достаточно высоком уровне ВАХ. Все это приводит к тому, что потери в лентах распределены неоднородно, т.к. в ленты с меньшей токонесущей способностью переменный ток может заходить до высокого уровня ВАХ. Необходимо

- определить, при каких условиях происходит распределение токов, соответствующее индивидуальным токонесущим способностям лент.
2. Слой серебра составляет всего 1 мкм, так что сопротивление этой ВТСП ленты в несверхпроводящем состоянии достаточно велико для использования ее в резистивном СОР. Продольная теплопроводность ленты низка, а ее токонесущая способность существенно (~ 10%) неоднородна по длине. Существуют слабые участки длиной порядка сантиметра, на которых возникают «горячие пятна» с высоким уровнем напряженности электрического поля и развивающимся тепловым переходом. «Горячие пятна» не удлиняются по причине низкой теплопроводности, и проводник перегорает на этих участках за относительно небольшое время.
 3. Проект СОР на 900 А, для которого разрабатывался токонесущий элемент из 6 лент, подразумевает конструкцию из 10 пар встречно включенных катушек. Необходимо было исследовать распределение тока и токонесущую способность на постоянном и переменном токе, влияние распределения поля, принять меры по усилению крайних витков для повышения токонесущей способности.
 4. Для 250 А модулей СОР необходимо было обеспечить требуемое время восстановления менее 5 секунд. Для этого необходимо соответствующее охлаждение, а также оптимизация длины ТНЭ в зависимости от параметров сети и времени отключения СОР.
 5. Для СОР на 250 А 3,5 кВ необходимо было провести испытания, имитирующие короткое замыкание.

2.3 Исследования ВТСП лент для резистивных СОР

В ходе выбора ВТСП ленты для СОР проведены:

1. Исследование зависимости сопротивления от температуры для различных ВТСП лент. Температурная зависимость сопротивления – самый важный параметр для токоограничительной ленты, поскольку определяет длину

относительно дорогостоящего ТНЭ. По результатам данного исследования выбрана ВТСП лента SF12100 со 100 микронной подложкой из хастеллоя. Примеры температурных зависимостей сопротивления приведены на рисунке 2.2.

2. Исследования токонесущей способности лент SuperPower SF12100 на постоянном и переменном токе в поле собственного тока, а также транспортных потерь в поле собственного тока (Рисунок 2.3). Потери носят преимущественно резистивный характер, что позволит произвести их масштабирование для лент той же конструкции с отличающимися ВАХ. На основе этих измерений можно также выбрать рабочий ток по допустимой величине тепловыделения в лентах.
3. Изучена анизотропия токонесущей способности лент SuperPower SF12100 во внешних полях, близких к величине максимального поля собственного тока СОТ (Рисунок 2.4).

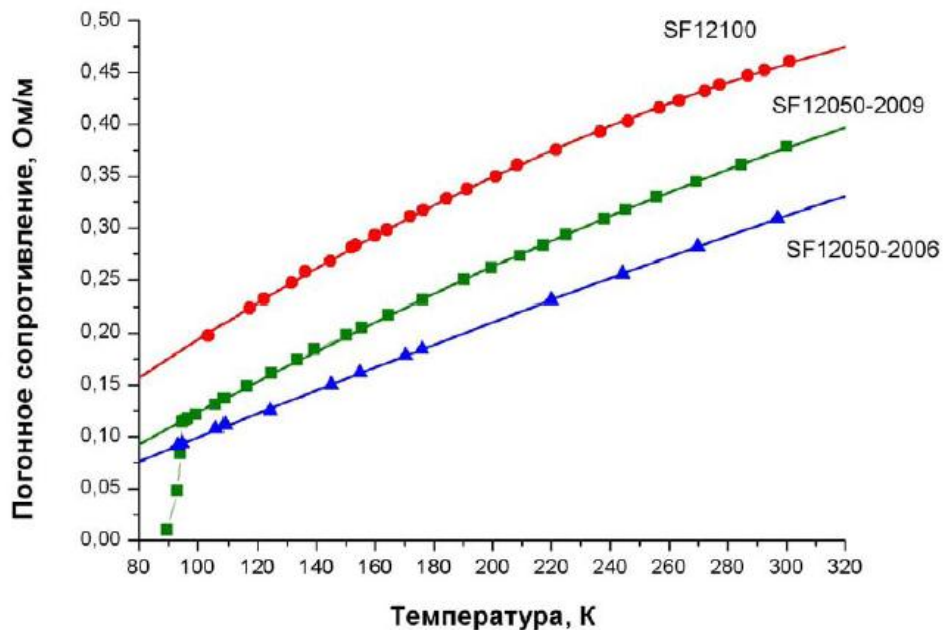
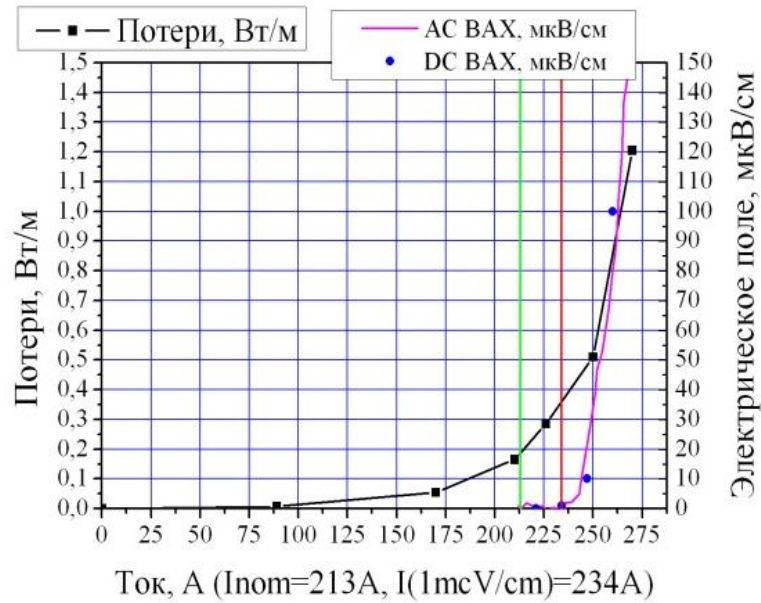
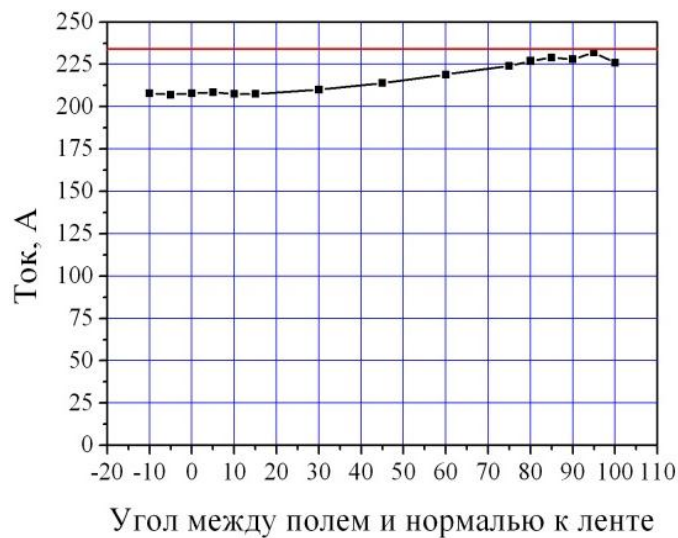


Рисунок 2.2 – Зависимость сопротивления различных ВТСП лент от температуры



Красная линия – ток по критерию 1 мкВ/см в поле собственного тока,
 зеленая – номинальный ток СОТ на ленту (213 А)

Рисунок 2.3 – ВАХ на переменном и на постоянном токе в поле собственного тока, транспортные потери на переменном токе от амплитуды тока



Красная линия – ток по критерию 1 мкВ/см в поле собственного тока. 0 градусов – поле перпендикулярно плоскости ленты, критток меньше на 10% .

Рисунок 2.4 – Постоянный ток в коротком образце на уровне напряженности электрического поля 1 мкВ/см от угла поля к нормали к поверхности ленты в поле $0,02\text{ Тл}$ – расчетная амплитуда поля на краях.

4. Исследование скорости распространения резистивной зоны лент SuperPower SF12100 и проблема «горячих пятен». Кроме экспериментальных исследований, произведены расчеты по методике, позволяющей моделировать любой режим работы СОР и рассчитывать длину ТНЭ в зависимости от номинального напряжения, заданных времени отключения и времени восстановления.

2.4 Тепловой переход и проблема «горячих пятен»

Для изучения явления теплового перехода на участке с пониженной токонесущей способностью и распространения нормальной зоны проведен эксперимент (Рисунок 2.5). Резистивный участок с тепловым переходом сгорает, резистивная фаза на соседние участки не распространяется.

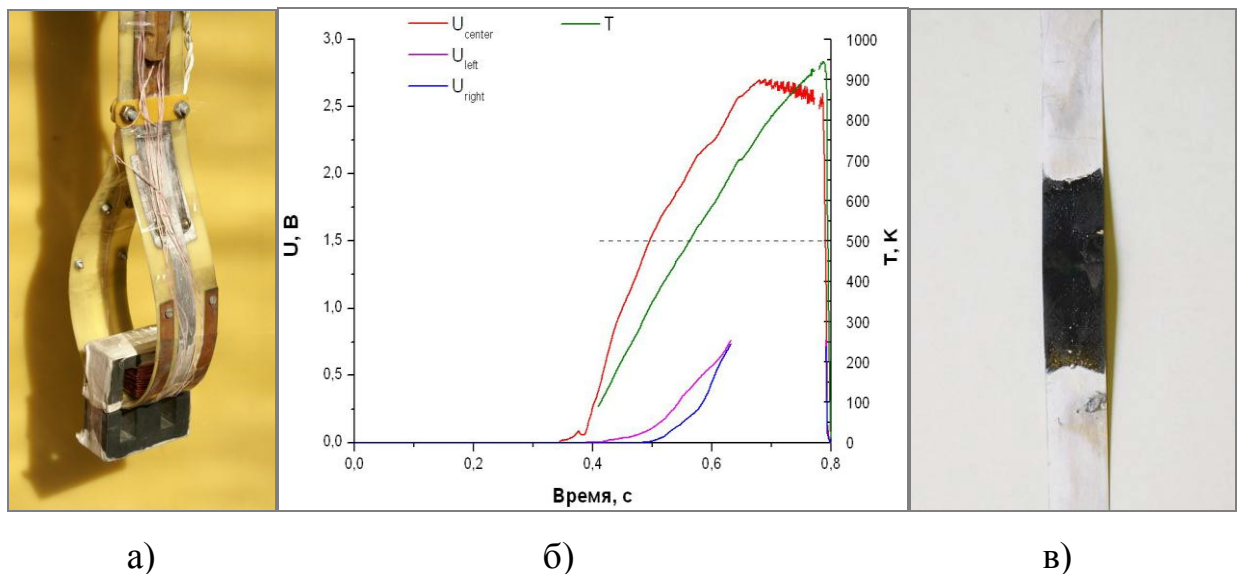


Рисунок 2.5 – Эксперимент по искусственному созданию «горячего пятна»: установка (а); температура и напряжение на участке с пониженной токонесущей способностью, напряжения на примыкающих участках (б); сгоревший участок ленты (в)

Центральная часть образца с постоянным током подвергалась кратковременному действию внешнего поля электромагнита, напряжение

измерялось на ней и на соседних участках. Температура выше 90 К вычислялась по сопротивлению образца. Область с высоким уровнем ВАХ почти не распространялась до тех пор, пока кусок ленты в поле не выгорал (за 0,4 сек в приведенном случае). Таким же образом и на таких же коротких участках (сантиметры) выгорал проводник в макетных образцах при отсутствии от защитного отключения и шунтирования. Проведена серия экспериментов с единичными ВТСП лентами, ВТСП лентами, шунтированными металлической лентой, двумя шунтированными ВТСП лентами при различных амплитудах поля и длительностях импульсов. На рисунке 2.5 представлен эксперимент, в котором одиночная шунтированная лента получила импульс сверхтока, приведший к сгоранию. В экспериментах с не шунтированными лентами сгорание происходило при меньших импульсах.

Произведен численный анализ этого эксперимента по следующей модели:

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} + I(t) \cdot E(I, T, x) - p \cdot \alpha (T(x, t) - T_{out}) = C_{cable} \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial t}, \quad (2.1)$$

где I – ток, А;

E – напряженность электрического поля;

T – температура сечения, К;

x – координата сечения вдоль длины ТНЭ, м;

t – время, с;

λ – теплопроводность ТНЭ, Вт/мК;

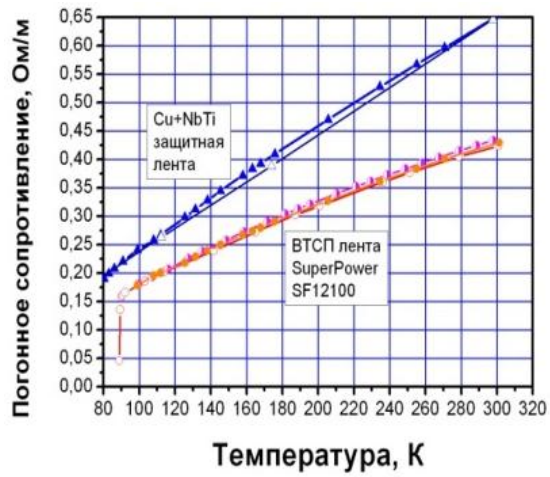
C – усредненная теплоемкость материалов сечения на метр ТНЭ, Дж/мК;

α – коэффициент теплопередачи в хладагент, Вт/м²К;

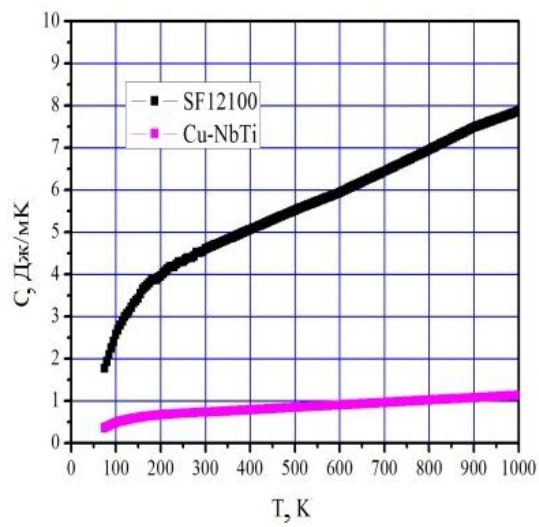
p – охлаждаемый периметр, м;

T_{out} – температура хладагента, К.

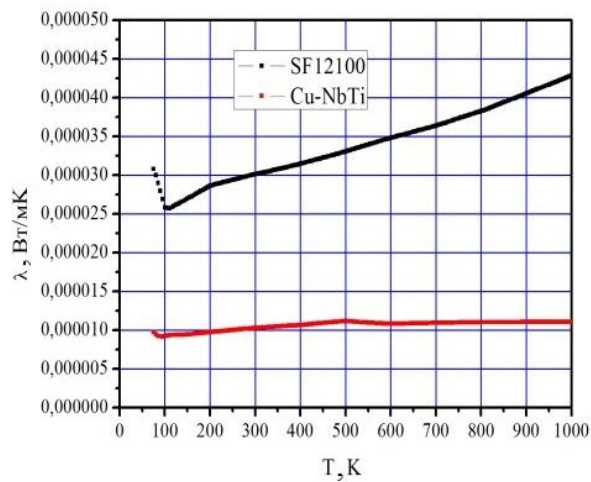
Удельное сопротивление, теплоемкость и теплопроводность в зависимости от температуры для ВТСП ленты и стабилизирующей ленты показаны на рисунке 2.6.



а)



б)



в)

Рисунок 2.6 – Зависимости сопротивления (а); удельной теплоемкости (б); теплопроводности (в) ВТСП ленты и резистивной защитной ленты от температуры

Применено приближение равномерного распределения температуры по сечению ТНЭ, учитывалась продольная теплопроводность ТНЭ и теплоотвод в жидкий азот. Для сравнения рассчитан также адиабатический нагрев. Результаты расчета температуры в центре «горячего пятна», а также напряжения на «горячем пятне» и соседних участках представлены на рисунке 2.7. На рисунке 2.7 а черной линией показан профиль тока, красной линией изображено измеренное напряжение, а фиолетовой – расчетное напряжение по модельной ВАХ. Также приведены напряжения на участке рядом с «горячим пятном» – розовая линия – расчетное, оранжевая и сиреневая линии – экспериментальные. На рисунке 2.7 б находятся временные зависимости температур. Оранжевой линией изображено экспериментальное значение температуры в центре, полученное по измеряемому сопротивлению ТНЭ в резистивном состоянии, при температуре выше 90 К. Измеренной температуре хорошо соответствует расчетная температура с учетом охлаждения (оранжевые круги), а также температура, рассчитанная в адиабатическом приближении (пустые круги). Столь же хорошее приближение к эксперименту получается при расчете температуры, произведенном с учетом измеряемого напряжения (пустые квадраты), а не по модельной ВАХ.

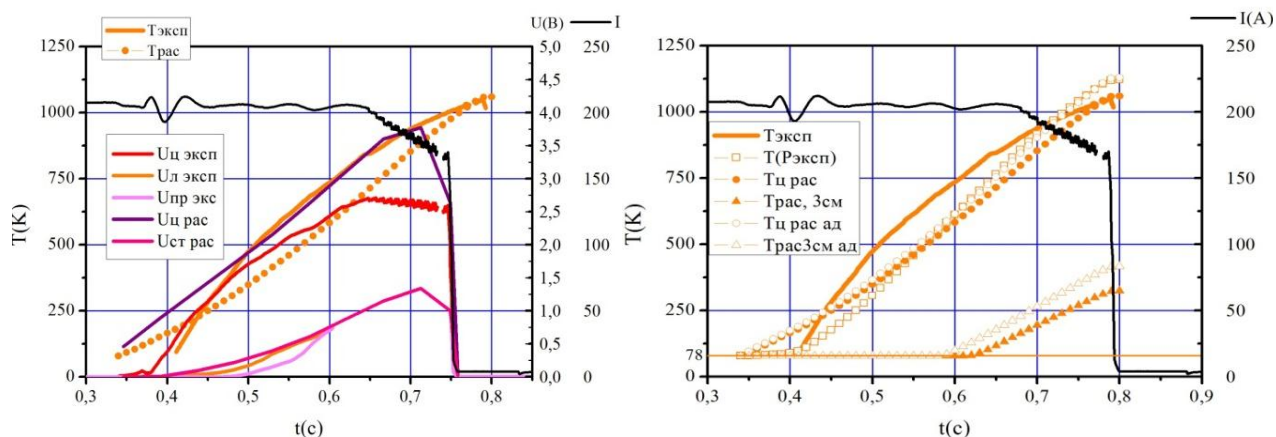


Рисунок 2.7 – Сравнение эксперимента по созданию «горячего пятна» и соответствующего расчета для середины образца и на примыкающих участках

Совпадение расчетных и экспериментальных результатов удовлетворительное. Расхождение обусловлено неоднородностью токонесущей способности по длине ленты, неравномерным распределением тепловыделения, неопределенностями охлаждения азотом в условиях взрывного испарения. Расхождения между экспериментальными и расчетными значениями в начале разогрева (наибольшие) обусловлены в основном неопределенностью размытия ВАХ.

На рисунке 2.8 представлены результаты расчета распределения температуры по сечению от времени, а также оценка скорости распространения резистивной фазы – всего 0,05-0,1 м/с даже для шунтированной ленты. Нагляднее показано сравнение с адиабатическим режимом – в момент разогрева влияние жидкого азота малосущественно, оно должно быть учтено в методике для расчета времени восстановления.

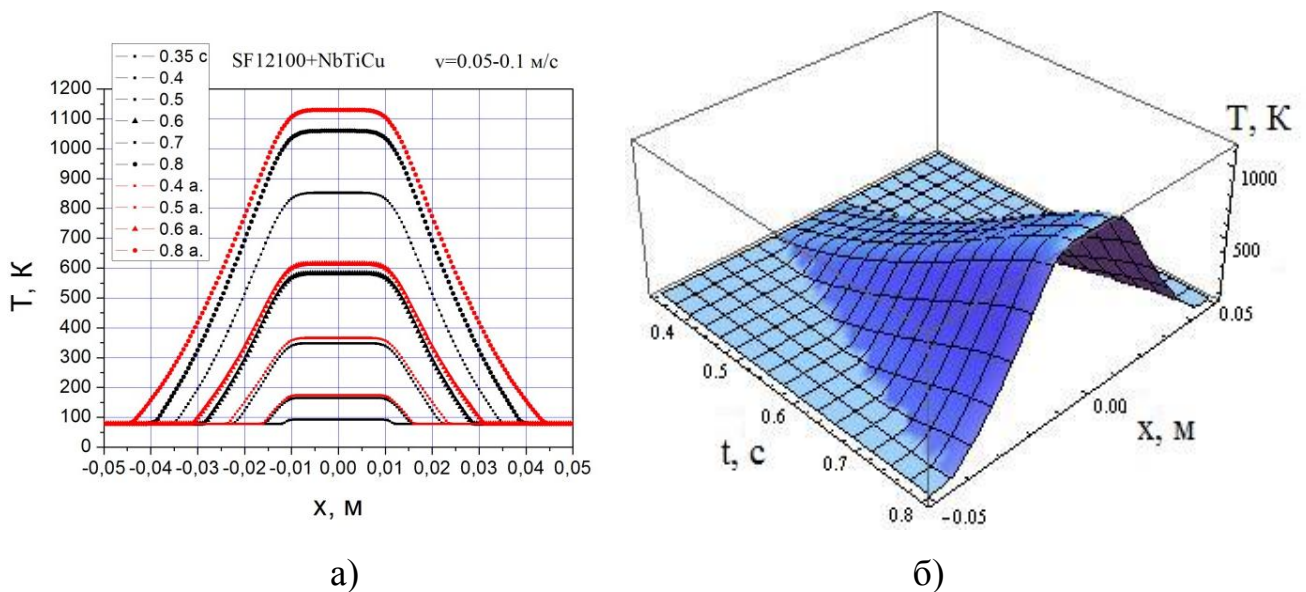


Рисунок 2.8 – Профили расчетной температуры образца в различное время, расчет скорости распространения, сравнение с адиабатическим режимом (а); отображение разогрева по длине образца от времени при учете охлаждения (б)

2.5 Защита ВТСП ленты резистивной фольгой

Предложено защищать ВТСП ленты резистивной фольгой, которая принимает на себя часть тока, а также часть тепловыделения благодаря высокой теплопроводности и электропроводности. В выбранной для экспериментальных устройств ленте толщиной 20 микрон (NbTi фольга с нанесенным с каждой стороны слоем меди толщиной 1 мкм) работает в качестве защиты именно слой меди. NbTi слой нужен для механической прочности. Из графика погонного сопротивления от температуры (рисунок 2.6 а) видно, что защитная лента (1 на 2, 3 или 6 ВТСП лент) незначительно увеличивает необходимую длину проводника токоограничивающего элемента. Из дальнейших экспериментов видно, что защитная лента спасает ВТСП ленты от перегорания. В качестве шунтирующего элемента при промышленном производстве ТНЭ для СОР можно рекомендовать, во-первых, нанесение слоя латуни на ВТСП ленты, во-вторых, стальную фольгу (в случае ТНЭ из многих параллельных лент), покрытую слоем меди или латуни.

2.6 Расчет длины ТНЭ, необходимой для ограничения тока

Для моделирования различных режимов работы СОР (КЗ с задаваемыми параметрами, восстановления, повторного включения) в сети с любыми параметрами и расчета параметров СОР по требованиям конкретной электросети применена математическая модель электродинамических и термодинамических процессов в ТНЭ СОР.

Система уравнений включает в себя уравнение теплового баланса в произвольном сечении ТНЭ (приближение однородности свойств по длине и однородности температуры по сечению ТНЭ) и уравнение, определяющее напряжение на терминалах СОР:

$$I(t) \cdot E(I, T) - p \cdot \alpha (T(t) - T_{out}) = C_{cable} \cdot \frac{\partial T(t)}{\partial t}, \quad (2.2)$$

$$U_{nom} \cdot \sin(\omega t + \varphi) - l \cdot E(I, T) - I(t) \cdot R_L(t) = L(t) \cdot \frac{\partial I(t)}{\partial t}, \quad (2.3)$$

$$T(t = 0) = 77,8$$

$$I(t = 0) = I_{nom} \sin(\varphi),$$

где I, T – независимые переменные, ток и температура ТНЭ,

E – напряженность электрического поля,

ρ – охлаждаемый периметр,

α – коэффициент теплоотдачи,

T_{out} – температура хладагента,

C_{cable} – теплоемкость сечения ТНЭ,

t – время,

U_{nom} – напряжение сети,

l – длина ТНЭ,

R_L – сопротивление нагрузки (меняется при коротком замыкании, отключении, повторном включении),

L – суммарная индуктивность СОР и нагрузки, также может изменяться.

Вольтамперная характеристика взята в виде:

$$E(I, T) = \rho_c(T) \cdot I(t) \cdot 0,5 \cdot (1 + T_{anh} \cdot (-I(t) - I_{sh1/2}(T)) / I_0(T)) \quad , \quad (2.4)$$

при $I(t) < -I_{sh1/2}(T)$

$$E(I, T) = -E_0(-I(t) / I_C(T))^{n(T)}, \quad \text{при } -I_{sh1/2}(T) \leq I(t) < 0 \quad , \quad (2.5)$$

$$E_0(I(t) / I_C(T))^{n(T)}, \quad \text{при } 0 < I(t) \leq I_{sh1/2}(T) \quad , \quad (2.6)$$

$$E(I, T) = \rho_c(T) \cdot I(t) \cdot 0,5 \cdot (1 + T_{anh} \cdot (I(t) - I_{sh1/2}(T)) / I_0(T)) \quad , \quad (2.7)$$

при $I(t) > I_{sh1/2}(T)$

$I_{sh1/2}$ – такой ток, при котором напряженность электрического поля сверхпроводящей вольтамперной характеристики (степенной функции) была бы равна половине напряженности электрического поля в случае чисто резистивной проводимости ТНЭ:

$$E_p \cdot (I_{sh1/2}(B, T)) = 0,5 \cdot I_{sh1/2}(B, T) \cdot \rho_{ТНЭ}(T), \quad (2.8)$$

Данная вольтамперная характеристика учитывает размытие перехода по току, температурные зависимости, проводимость ТНЭ в резистивном состоянии, позволяет работать с переменным током. Более наглядно ВАХ можно увидеть на рисунке 2.9.

На рисунке 2.10 показан пример расчета режима токоограничения короткого замыкания, с длиной ТНЭ 30Г, рассчитанной для времени отключения 100 мс, и времени восстановления (охлаждения до 78 К) между 4 и 5 секундами.

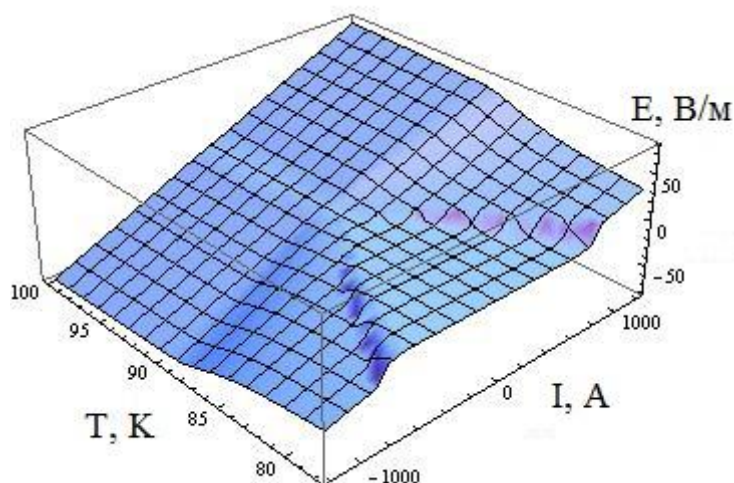


Рисунок 2.9 – Вольтамперная характеристика для расчетов на переменном токе

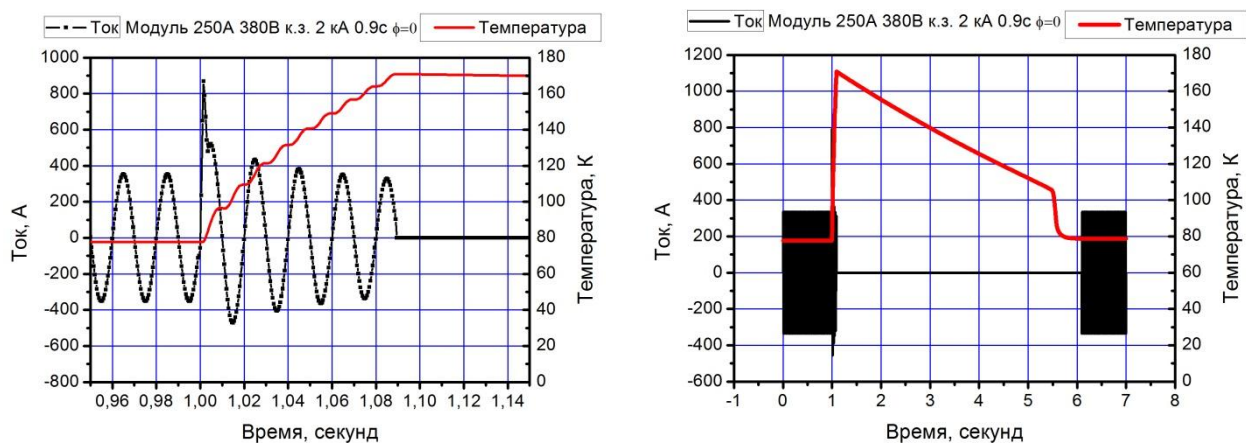


Рисунок 2.10 – Расчетные временные зависимости тока модуля и температуры ТНЭ при КЗ

Из рисунка 2.10 видно, что время восстановления зависит от максимальной температуры ТНЭ не линейно – ниже 110 К наступает быстрое охлаждение,

обусловленное как свойствами жидкого азота, так и резким снижением теплоемкости материалов. Поэтому, чтобы обеспечить время восстановления меньше 1 секунды, необходимо подобрать длину ТНЭ и время нагрева (отключения нагрузки) так, чтобы максимальная температура не превышала 110 К. Используемая расчетная методика позволяет спроектировать модуль СОТ (подобрать длину и свойства ТНЭ) под любые технические условия.

2.7 Конструкция, технология изготовления и испытания модулей на ток 250А

ВТСП токоограничивающий элемент представляет собой цилиндрическую бифилярную катушку, намотанную на стеклопластиковый каркас диаметром 73 мм и длиной 520 мм. Длина токонесущего элемента, состоящего из двух ВТСП лент SF12100 SF и одной защитной шунтирующей ленты, была рассчитана по вышеописанной методике и составляет 7,5 м на один слой.

В верхнюю и нижнюю часть стеклопластикового каркаса вклеены полукольца из медной фольги толщиной 0,5 мм, к которым припаиваются выводы ВТСП обмотки. Полукольца в верхней части каркаса – контактные, к ним припаиваются концы обоих слоев ВТСП обмотки, нижнее полукольцо служит не только для фиксации внутреннего спая ВТСП лент в процессе намотки, но и само является частью спая между ВТСП слоями.

ВТСП обмотка токоограничивающего элемента состоит из четырех слоев, которые поочередно наматываются друг поверх друга.

Первый слой состоит из ВТСП ленты и расположенной поверх нее защитной ленты (см. рисунок 2.11). Намотка ВТСП ленты осуществляется в положении «сверхпроводником вверх». В процессе намотки выдерживается постоянный угол наклона отдающих бобин с ВТСП лентой и защитной лентой относительно каркаса, за счет чего обеспечивается равномерный прижим ВТСП ленты к каркасу без ее перекосов. Смещение укладчика с ВТСП лентой и угол наклона отдающих бобин постоянно контролируются и в случае необходимости корректируются по ходу процесса намотки. Натяг ВТСП ленты согласно ее

спецификациям ограничен усилием 15 Н. Дополнительный прижим ВТСП ленты к каркасу осуществляется за счет защитной ленты, на усилие натяга которой таких ограничений нет.

После намотки первого слоя концы ВТСП и защитной ленты припаивается к одному из верхних контактных полуколец, после чего напаяется медный лепесток толщиной 0,5 мм. Таким образом, ВТСП лента оказывается заключенной между двумя медными пластинами с развитой поверхностью электрического контакта, что позволяет добиться низкого сопротивления спаю.

После намотки первого ВТСП слоя производится намотка второго слоя, состоящего из ВТСП ленты и каптоновой (полиимидной) электрической изоляции. Намотка ВТСП ленты осуществляется в положении «сверхпроводником вниз». Процесс намотки аналогичен намотке предыдущего слоя. Перед его началом отдающая бобина с ВТСП лентой переворачивается на намоточном станке на 180° , а вместо бобины с защитной лентой устанавливается бобина с электрической изоляцией. Дополнительный прижим ВТСП ленты к каркасу осуществляется при помощи электрической изоляции. Ширина каптоновой изоляционной ленты на 2 мм больше, чем у ВТСП ленты, что позволяет гарантированно электрически изолировать всю поверхность сверхпроводника.

Третий слой, состоящий из ВТСП ленты в положении «сверхпроводником вверх» и защитной ленты, наматывается аналогично первому слою. Намотка четвертого слоя (ВТСП лента «сверхпроводником вниз» и электрическая изоляция) производится так же, как и для второго слоя. Выводы от всех слоев ВТСП элемента запаиваются между лепестками из медной фольги и образуют контактные площадки, к которым присоединяются соединительные шины.

Для механического усиления каркаса ВТСП элемента в верхней части стеклотекстолитовой трубы клеивается дополнительное стеклопластиковое кольцо. К готовому токоограничивающему элементу при помощи четырех болтов М6 присоединяются полукруглые лепестки контактов с припаянными к ним соединительными шинами. Для обеспечения равномерного прижима контактных

лепестков к токоограничивающему элементу поверх них располагаются полукруглые нержавеющей пластинки.

Индуктивность каждого модуля составляет 0,32 мкГн.

Изготовлено 8 модулей вышеописанной конструкции.

Испытания модулей 250 А были проведены на номинальном токе и в режимах коротких замыканий различной длительности. Схема испытательного стенда представлена на рисунке 2.12 а. При испытании в режимах короткого замыкания вводился номинальный ток (подбором активной нагрузки), затем нагрузка шунтировалась, через время 90-110 мс ток выключался. Повторное включение осуществлялось через несколько секунд. Пример осциллограммы переходного процесса при ограничении тока короткого замыкания приведен на рисунке 2.12 б.

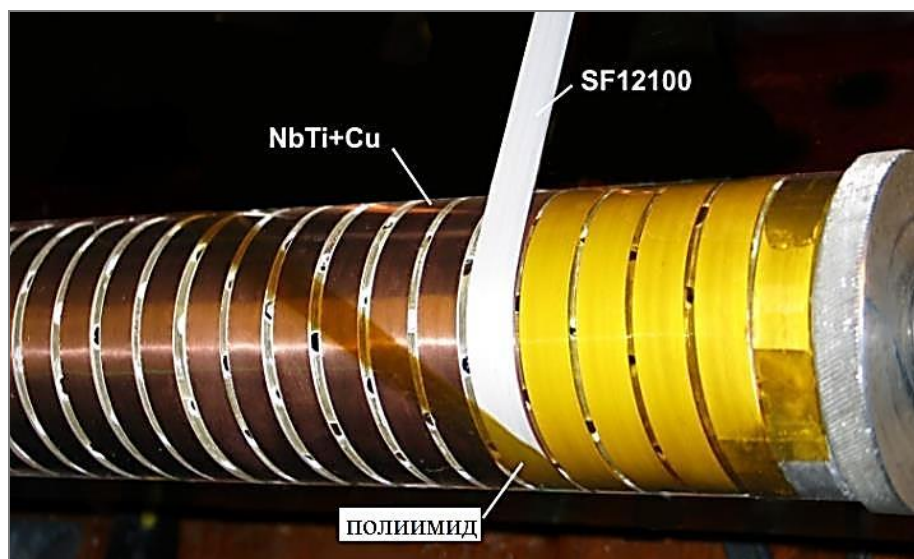


Рисунок 2.11 – Конструкция модуля COT на 250 А 380 В

Испытания показали, во-первых, удовлетворительную глубину токоограничения уже на первой полуволне; во-вторых, время восстановления температуры составило около 4,7 секунды при времени отключения 100 мс. Расчетные данные из предыдущего раздела согласуются с экспериментальными значениями тока и температуры. Незначительные расхождения в амплитуде тока на первой полуволне (расчетной и экспериментальной) обусловлены

неопределенностью токонесущей способности по длине, нюансами охлаждения, неточностью фазы короткого замыкания (формой фронта короткого замыкания). Также остается актуальной задача нахождения реальной ВАХ при высоких уровнях напряженности электрического поля – приближающихся к резистивному напряжению – при температуре до 90 К и токе до нескольких «критических».

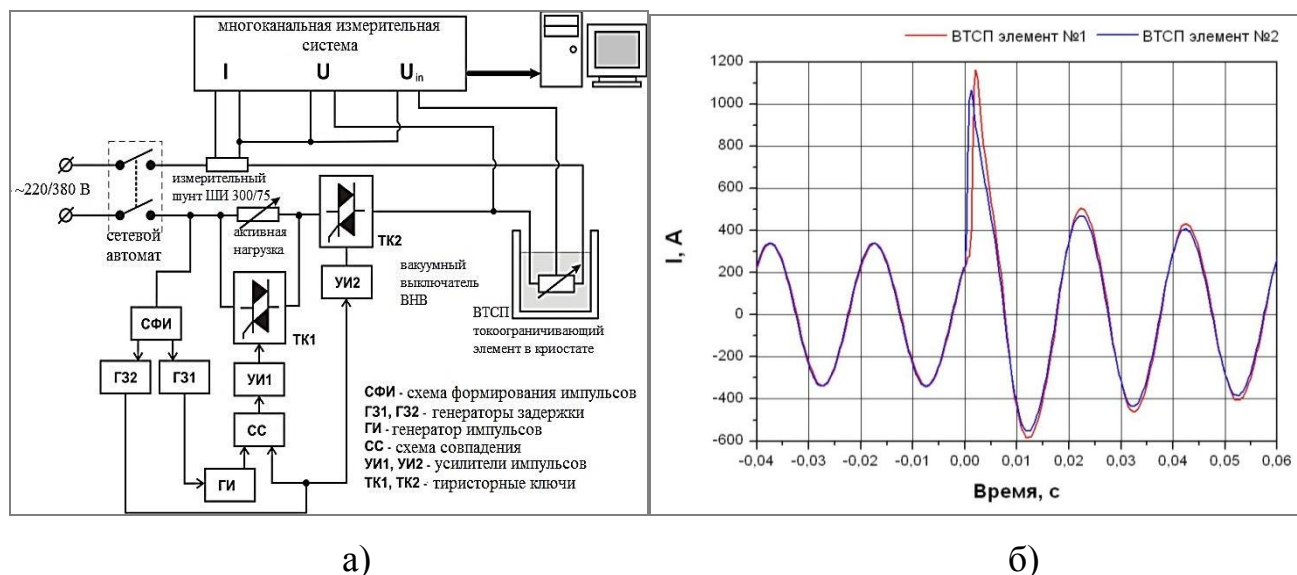


Рисунок 2.12 – Схема экспериментальной установки (а);
пример осциллограммы КЗ (б)

Все 8 модулей выдержали без деградации неоднократные короткие замыкания на различных фазах синусоиды. Благодаря наличию защитной шунтирующей ленты деградации не произошло и после коротких замыканий на пониженном напряжении (более медленный переход), а также после неполного восстановления рабочей температуры.

2.8 Конструкция и испытания прототипа СОТ на 250 А 3,5 кВ

Прототип СОТ на 250 А 3,5 кВ состоит из 8 последовательно соединенных модулей, описанных в предыдущем разделе. Общий вид прототипа СОТ приведен на рисунке 2.13 а. Соединения производились медными шинопроводами. Индуктивность устройства (не считая токовводы) составляет 3,9 мкГн, из них 2,56

мкГн составляют индуктивности модулей, остальное – индуктивности соединителей.

Испытания прототипа СОР на 250 А 3,5 кВ при номинальном токе проводились по такой же схеме, как и испытания отдельных модулей. По вольтамперным характеристикам рассчитывались потери. Тепловыделения в криогенном объёме составляют ~ 12 Вт при токе 250 А, без учёта токовводов. Из них на тепловыделения в спаях и соединениях приходится 7,5 Вт, а потери на переменном токе в ВТСП ТНЭ модулей составляют 4,5 Вт.

8-модульный прототип показал токонесущую способность на переменном токе, соответствующую техническому заданию.

Испытания прототипа СОР на 250 А 3,5 кВ производились в режиме имитации короткого замыкания при разряде конденсаторной батареи, заряженной до 5 кВ. Схема установки для данного испытания показана на рисунке 2.13 б. Испытания показали глубину токоограничения, соответствующую техническим требованиям. Результаты испытания показаны на рисунке 2.13 в. Этот эксперимент численно промоделирован для подтверждения расчетной методики, и результаты расчетов удовлетворительно совпали с экспериментальными данными. Математическая модель, по которой произведено моделирование эксперимента, аналогична модели, по которой моделируются режимы КЗ и восстановление модулей СОР.

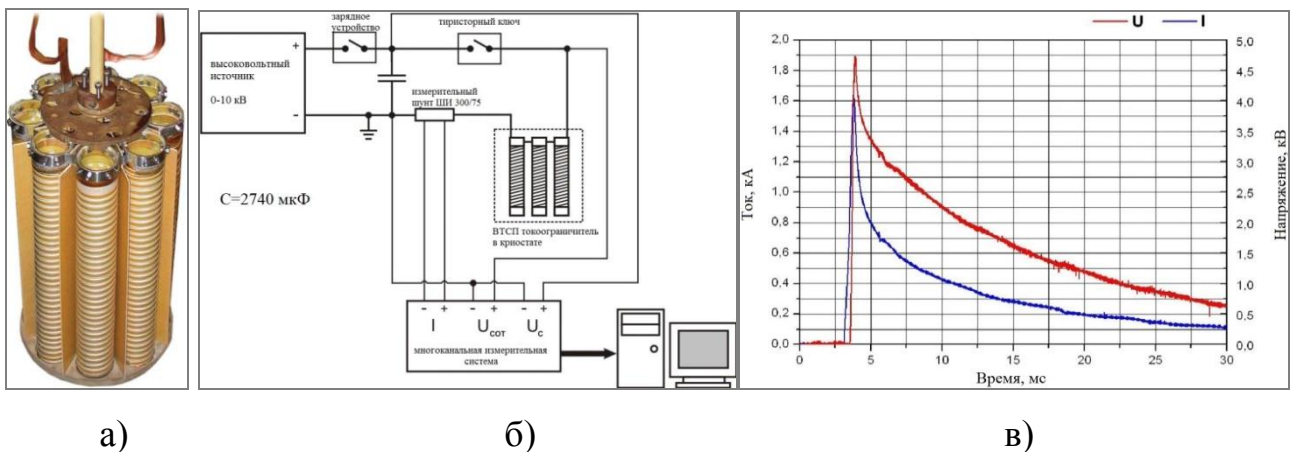


Рисунок 2.13 – Конструкция 8-модульного СОР (а); схема установки для испытания (б); испытание СОР разрядом конденсаторной батареи (в)

Система уравнений включает в себя уравнение теплового баланса в произвольном сечении ТНЭ (приближение однородности свойств по длине и однородности температуры по сечению ТНЭ), и уравнение, определяющее напряжение на терминалах СОТ:

$$I(t) \cdot E(I, T) - p \cdot \alpha (T(t) - T_{out}) = C_{cable} \cdot \frac{\partial T(t)}{\partial t}, \quad (2.9)$$

$$U_{разр} - l \cdot E(I, T) - I(t) \cdot R_L(t) = L(t) \cdot \frac{\partial I(t)}{\partial t}, \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} T(t=0) &= 77,8 \\ I(t=0) &= I_{nom} \sin(\varphi), \end{aligned} \quad (2.11)$$

где I, T – независимые переменные, ток и температура ТНЭ,

E – напряженность электрического поля,

p – охлаждаемый периметр,

α – коэффициент теплоотдачи,

T_{out} – температура хладагента,

C_{cable} – теплоемкость сечения ТНЭ,

t – время,

$U_{разр}$ – напряжение на конденсаторной батарее,

l – длина ТНЭ,

R_L – сопротивление нагрузки (меняется при коротком замыкании, отключении, повторном включении),

L – суммарная индуктивность СОТ и нагрузки, также может изменяться.

Вольтамперная характеристика взята в виде:

$$E(I, T) = E_0 (I(t) / I_c(T))^{n(T)}, \text{ при } 0 < I(t) \leq I_{sh1/2}(T), \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} E(I, T) &= \rho_c(T) \cdot I(t) \cdot 0.5 \cdot (1 + \text{Tanh} \cdot (I(t) - I_{sh1/2}(T)) / I_0(T)) \\ &\text{при } I(t) > I_{sh1/2}(T) \end{aligned}, \quad (2.13)$$

$I_{sh1/2}$ – такой ток, при котором напряженность электрического поля сверхпроводящей вольтамперной характеристики (степенной функции) была бы

равна половине напряженности электрического поля в случае чисто резистивной проводимости ТНЭ:

$$E_p(I_{sh1/2}(B, T)) = 0.5 \cdot I_{sh1/2}(B, T) \cdot \rho_{ТНЭ}(T), \quad (2.14)$$

Модельная ВАХ ТНЭ изображена на рисунке 2.14 а. Результаты расчета температуры ТНЭ и результаты расчета тока СОТ в сравнении с результатами измерений тока приведены на рисунке 2.14 б. Измеренный ток и ток, рассчитанный по данной модели, практически совпадают. Температура ТНЭ не поднималась выше 90 К, то есть стабилизировалась теплоотводом в кипящий азот (наиболее эффективным в диапазоне температур 85-95 К). Тепловыделение составило всего ~20 кДж, т.е. около 160 Дж/метр ТНЭ. Это близко по значению к такой температуре и тепловыделению при КЗ, на которые стоит рассчитывать СОТ со временем восстановления 0,5-1 секунда.

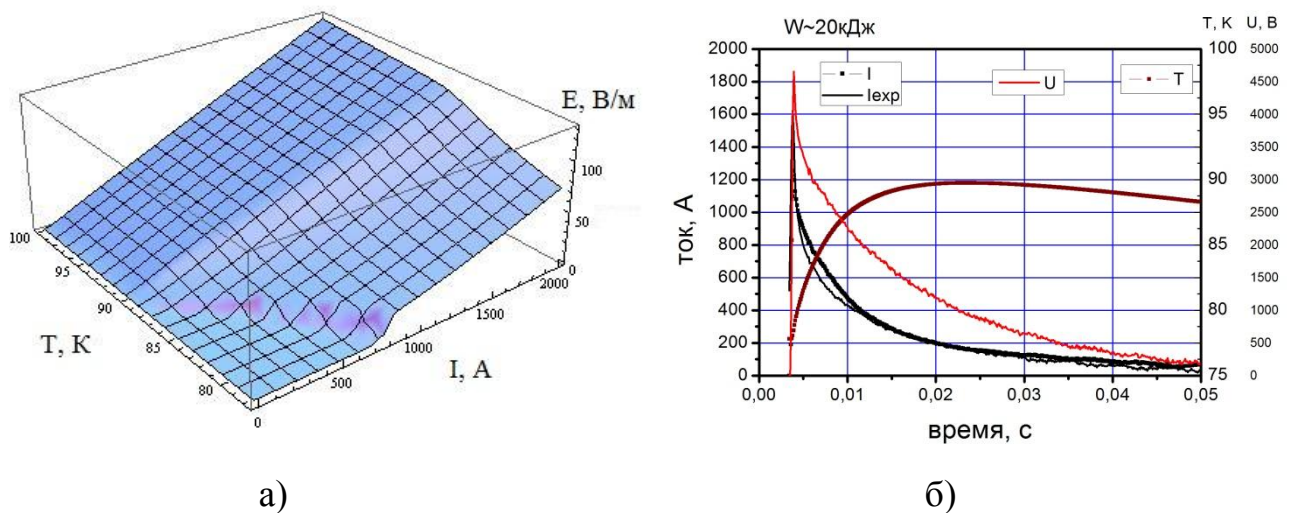


Рисунок 2.14 – ВАХ, используемая в расчетной модели (а);
расчетные ток и температура ТНЭ (б)

Выводы по главе 2:

1. Для решения проблемы «горячих пятен» предложено использование защитного покрытия (или дополнительной ленты) из резистивного материала, чтобы уменьшить локальный нагрев. Также желательно применение защитного отключения при перегрузке током выше номинального.
2. Создано экспериментальное автоматизированное намоточное устройство для изготовления модулей СОТ диаметром до 900 мм с числом параллельных лент до 6.
3. 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.
4. Примененные методики численного моделирования тепловых процессов в ТНЭ резистивных СОТ при КЗ успешно проверены при обсчете экспериментов. Распределения температуры и напряженности электрического поля, рассчитанные по данным методикам, близки к результатам экспериментов. Это позволяет моделировать любые режимы работы СОТ с их помощью и рассчитывать параметры конструкции СОТ.

3 РАЗРАБОТКА ТНЭ ДЛЯ ПРОТОТИПА СОТ НА 900 А 27,5 КВ

3.1 Проектирование прототипа СОТ на 900 А 27,5 кВ

Однофазные ВТСП токоограничители переменного тока 27,5 кВ предназначены для работы в тяговых сетях РЖД. Их использование будет наиболее эффективно в случае комплексной модернизации тяговой подстанции с установкой сразу нескольких токоограничителей, оснащенных общей системой криогенного обеспечения.

При проектировании было принято решение использовать для данного прототипа СОТ массово выпускаемую ВТСП ленту с критическим током в 300 А, что требует параллельного соединения шести ВТСП лент для обеспечения номинального действующего значения переменного тока 900 А. Увеличение числа параллельно соединенных проводников ухудшает условия охлаждения ВТСП проводников, в наихудшем случае это может привести к невыполнению требований технического задания по времени восстановления (не более 7 с). Как показали испытания макетного образца ВТСП токоограничителя на 3,5 кВ и 250 А, тепловыделения в спаех (около 1 Вт на токоограничивающий элемент) значительно превосходят выделения тепла, связанные с потерями на переменном токе.

В силу описанных выше причин назрела необходимость изменения конструкции ВТСП токоограничивающего элемента с целью увеличения охлаждаемой поверхности, снижения количества спаев и уменьшения их сопротивления, а также улучшения технологичности конструкции и упрощения процесса изготовления и сборки. ВТСП токоограничивающая сборка представляет большое число коаксиально расположенных однослойных цилиндрических катушек, намотанных шестью параллельными ВТСП проводниками, собранными в три пакета, по две ВТСП ленты сверхпроводящими слоями друг к другу, с латунным стабилизатором толщиной 25 мкм между ними. Использование дополнительной стабилизации позволяет защитить ВТСП

проводник от локальных перегревов, которые могут привести к перегоранию токоограничителя. Данное решение было апробировано на макетном образце ВТСП токоограничителя, его эффективность подтверждена многочисленными опытами по имитации короткого замыкания. За счет размещения пакетов ВТСП лент в ряд, поверхность охлаждения удалось увеличить в три раза, что должно сократить время восстановления. Значительное увеличение диаметров ВТСП секций позволило сократить число спаев и увеличить поверхность каждого спаев. Ожидается, как минимум, двукратное снижение тепловыделений в спаев и соединительных шинах по сравнению с эскизным проектом.

Численное моделирование работы СОТ в режимах КЗ было произведено, используя численную модель, описанную в главе 2 и применяемую ранее для моделирования режимов единичных модулей СОТ 380 В 250 А. Пример моделирования КЗ приведен на рисунке 3.1.

Для компактного размещения сверхпроводника в криостате была предложена конструкция токоограничивающего элемента из 20 коаксиально расположенных однослойных цилиндрических катушек, намотанных на стеклопластиковые каркасы, высотой 1000 мм и толщиной 7 мм. Расстояние между каркасами 7 мм, на каждый каркас в ряд наматывается 3 пачки из двух параллельных ВТСП проводников с латунным стабилизатором. Секции соединены последовательно таким образом, что токи протекают в них в противоположных направлениях, следовательно, индуктивность системы минимальна. Общий вид СОТ в разрезе и схема конструкции обмоток СОТ показаны на рисунке 3.2.

Согласно разрабатываемой конструкции СОТ состоит из 20 попарно сгруппированных секций. Диаметр внутренней секции токоограничителя по обмотке составляет 440 мм, а диаметр всей ВТСП сборки 972 мм. Обмотка внутренних секций в каждой из 10 пар состоит из 22 витков (высота, занимаемая сверхпроводником, составляет 920 мм), обмотка внешних секций насчитывает 21 виток (высота намотки 880 мм).

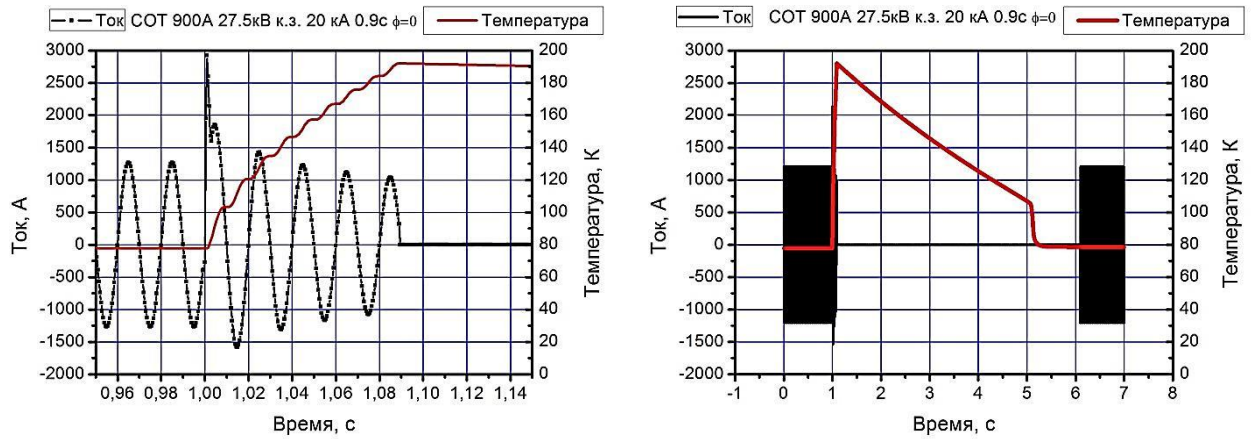


Рисунок 3.1 – Расчетное токоограничение и время восстановления для КЗ с током 20 кА и временем отключения 0,09 секунды

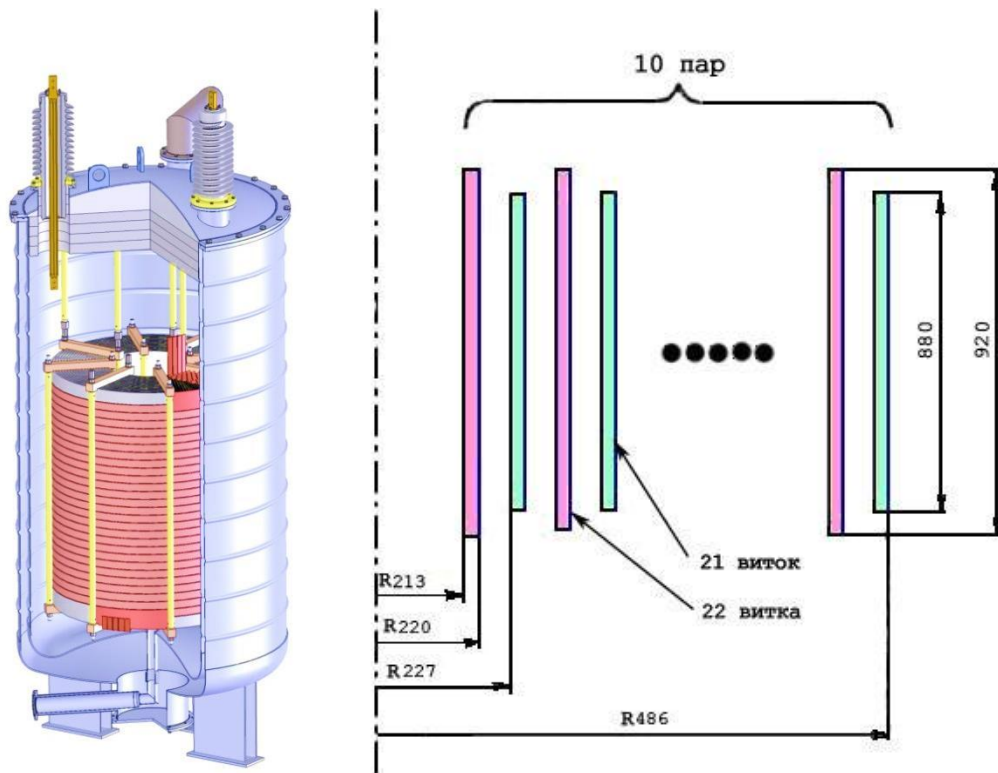


Рисунок 3.2 – Конструкция прототипа СОР на 900 А 27,5 кВ

3.2 Разработка конструкции и исследования образцов ТНЭ для СОР на 900 А

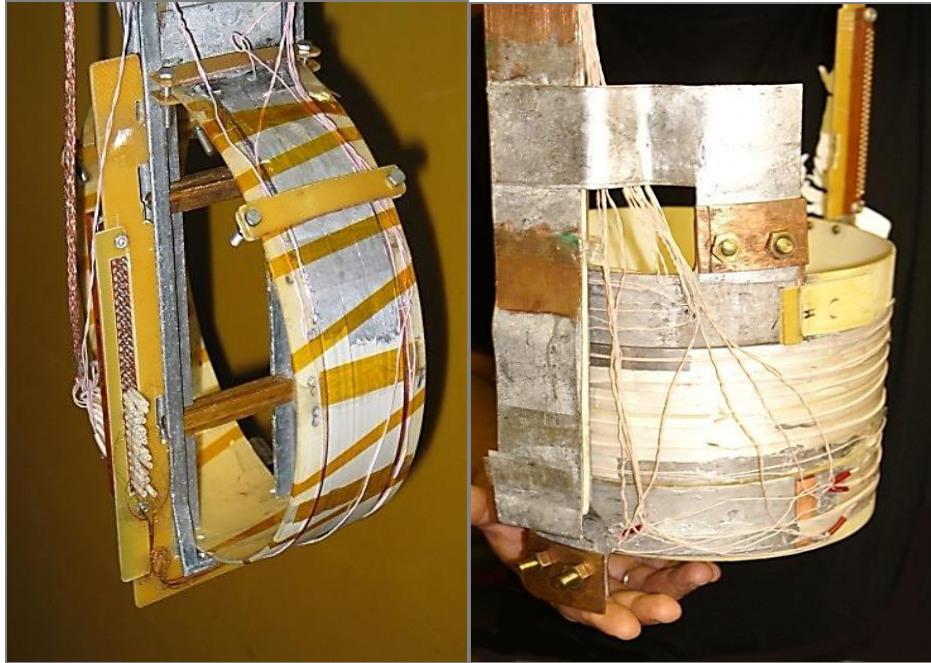
В целях разработки конструкции ТНЭ для проекта СОР, описанного в предыдущем разделе, необходимо было обеспечить токонесущую способность ТНЭ, то есть:

- равномерное распределение тока между лентами на переменном токе;
- однородную ВАХ ТНЭ по всей длине обмоток, чему могут воспрепятствовать краевые эффекты собственного поля.

Для решения этих задач были созданы образцы ТНЭ в виде одно и трех витковых обмоток с токовыми терминалами и проведены исследования их:

- токонесущей способности на постоянном и переменном токе;
- распределения постоянного и переменного тока;
- потерь на переменном токе;
- распределения собственного поля и его влияния на токонесущую способность и потери.

Образцы были намотаны на оправки диаметра порядка 200 мм и состояли из одного или двух слоев из 3 или 6 параллельно соединенных ВТСП лент (Рисунок 3.3). Поведение токов в лентах было исследовано по данным массива датчиков Холла и вольт-амперных характеристик нескольких лент см. рисунок 3.4, где показана схема коаксиальной пары катушек из ТНЭ для 900 А СОТ. Все образцы изготовлены на экспериментальном устройстве для автоматизированной намотки модулей СОТ. В двухслойных образцах применена защита ВТСП лент дополнительной резистивной лентой, которая позволяет избежать перегорания ВТСП лент в режиме КЗ.



а)

б)

Рисунок 3.3 – 1-витковый макет с 6 лентами и защитной лентой (а); 3-витковый макет с тремя лентами и двумя дополнительными лентами на краях крайних витков (б)

Многоленточные токонесущие элементы были вначале испытаны на постоянном и переменном токах отдельно. Затем они были коаксиально смонтированы и встречно включены, чтобы уменьшить собственное поле и индуктивность. Несмотря на то, что токонесущие способности лент далеки от равенства, общий ток токонесущего элемента близок к сумме токов отдельных лент (около 750 А для 3 и 1350 А для 6 лент). На 900 А действующего значения 6-ленточный макет работал стабильно, при 1000 А действующего значения произошел тепловой переход.

Распределение тока между лентами (или парами лент) исследовалось по собственному полю токов лент, измеряемому массивом датчиков Холла. Расчетное распределение поля вблизи лент в тех местах, где были установлены датчики, приведено на рисунке 3.5 а. Значения токов лент рассчитывались по показаниям датчиков Холла, расположенных возле центров лент, и измерявших поле, параллельное поверхности лент и перпендикулярное их оси. Влияние тока

соседних лент составляет несколько процентов, если рассматривать приближение равномерного распределения тока ленты по ее ширине. На точность исследования может негативно влиять неравномерность распределения тока по ширине ленты, особенно существенная при токах много меньше критических. Сумма токов, вычисленных по показаниям датчиков Холла, совпадала с током всего ТНЭ, измеренным при помощи шунта, с точностью до 10%. Это достаточно для исследования распределения токов, если нормировать токи так, чтобы сумма их стала равна току, измеряемому на общем измерительном шунте ТНЭ.

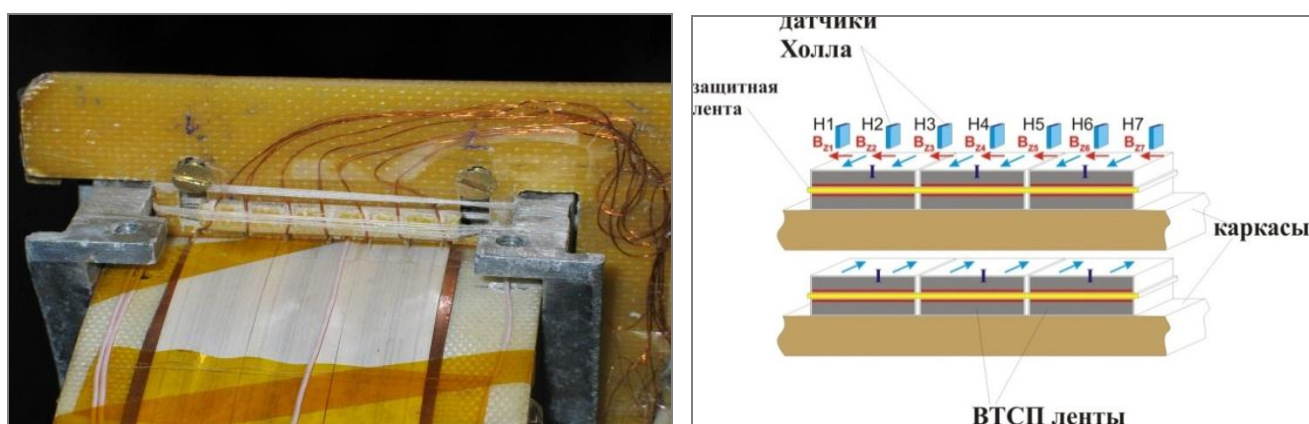


Рисунок 3.4 – Конструкция ТНЭ для проекта СОТ на 900 А 27.5 кВ и расположение массива датчиков Холла для исследования распределения тока

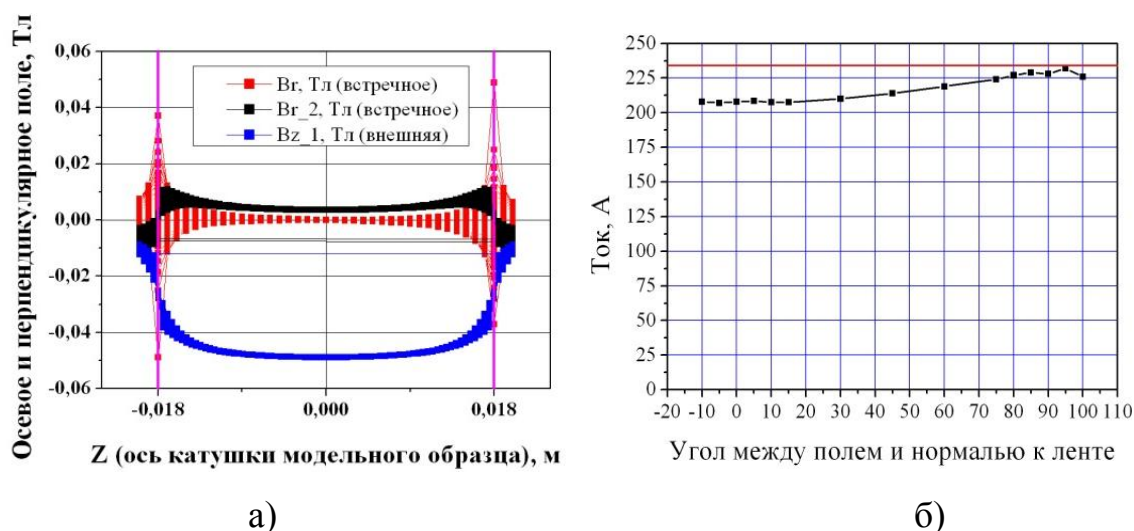


Рисунок 3.5 – Распределение собственных полей вблизи ТНЭ (а); угловая зависимость критического тока ВТСП лент в поле 0,02 Тл, перпендикулярном поверхности лент (б)

Влияние ВАХ токовых терминалов (спаев) на распределение постоянных токов приведено на рисунке 3.6. Сверхпроводящая часть ВАХ спаев может регулировать распределение тока. На этой паре графиков видно, как спаи с их ВАХ регулируют распределение токов. Сначала ток заходит больше в третью ленту, сопротивление спаев с которой меньше. Затем, когда на 3-й ленте возникает ВАХ сверхпроводника, ток перераспределяется в 1-ю и 2-ю и, когда и там появляется видимая ВАХ, ток 3-й ленты начинает увеличиваться. На выводе тока перераспределение происходит симметрично, в обратном порядке.

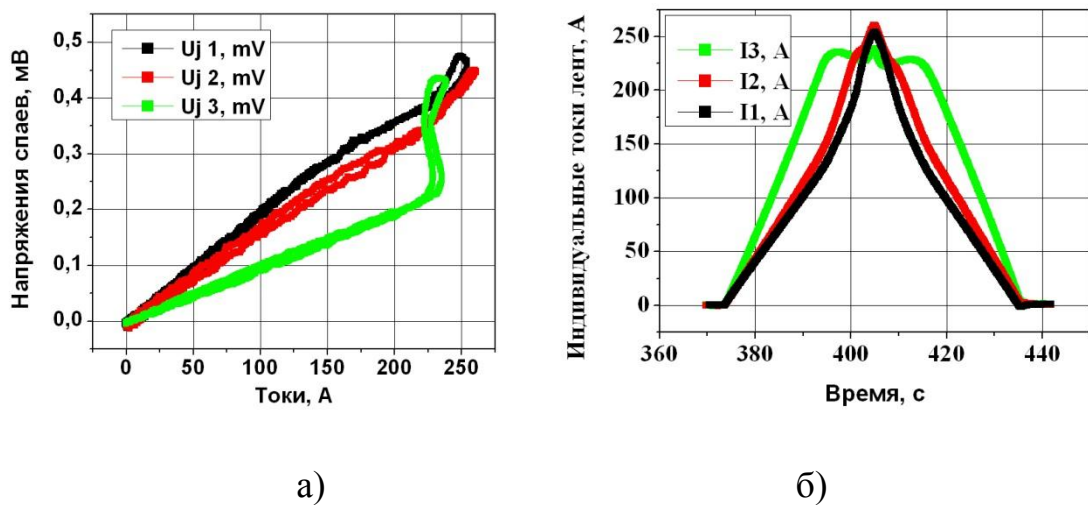


Рисунок 3.6 – ВАХ терминалов от индивидуальных токов лент а) токи лент от времени (б)

3.3 Эффект собственного поля на крайних лентах крайних витков, шунтирование дополнительной ВТСП лентой

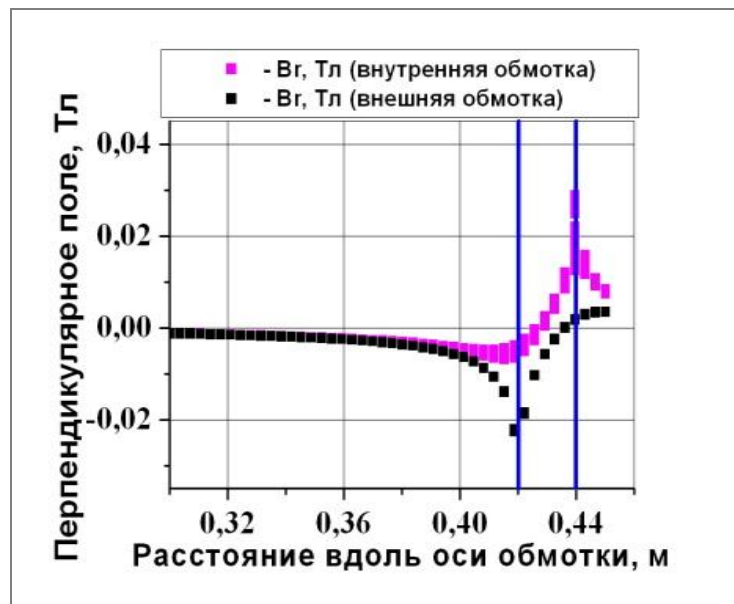
Проведенные расчеты распределения поля для СОТ (рисунок 3.7 а) и для макетных образцов (рисунок 3.7 б) показали наличие пиков перпендикулярной составляющей магнитного поля на краях обмоток.

Около обмоток внутренних пар катушек 27,5 кВ СОТ пики перпендикулярного поля составляют 0,02-0,03 Тл на краях обеих обмоток при $x = 0,42$ м и 0,44 м. В секции 3-виткового макета пики перпендикулярного поля амплитудой около 0,02 Тл видны на краях крайних лент крайних витков. Для двух

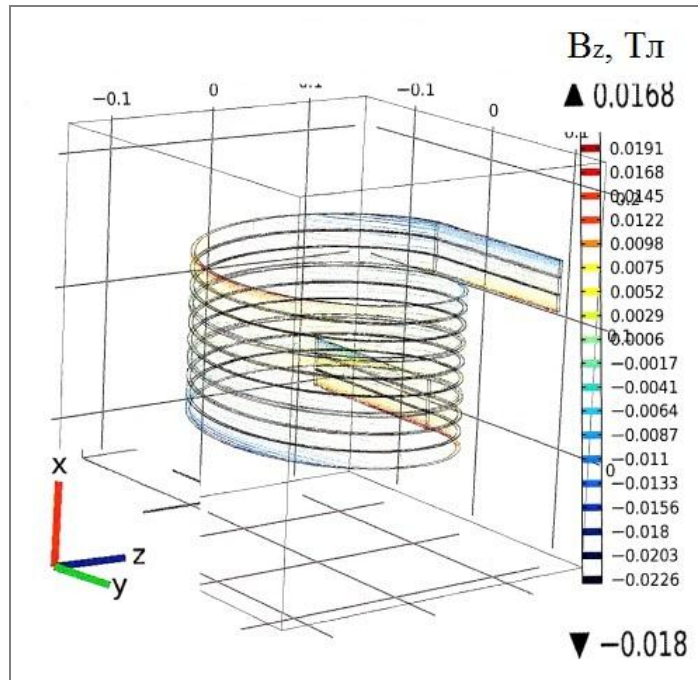
параллельных 3-ленточных проводников со встречными токами по 250 А в каждой ленте пики перпендикулярного поля составляют около 0,01 Тл.

Как видно на рисунке 3.5 б, где представлена угловая зависимость тока по критерию 1 мкВ/см в поле 0,02 Тл (такова расчетная амплитуда поля на краях), краевые пики перпендикулярной составляющей поля должны снижать токонесущую способность крайних лент на 10%. Это приводило бы к снижению тока всего устройства и значительному увеличению потерь. Поэтому предложено шунтировать крайние ленты крайних витков дополнительными ВТСП лентами.

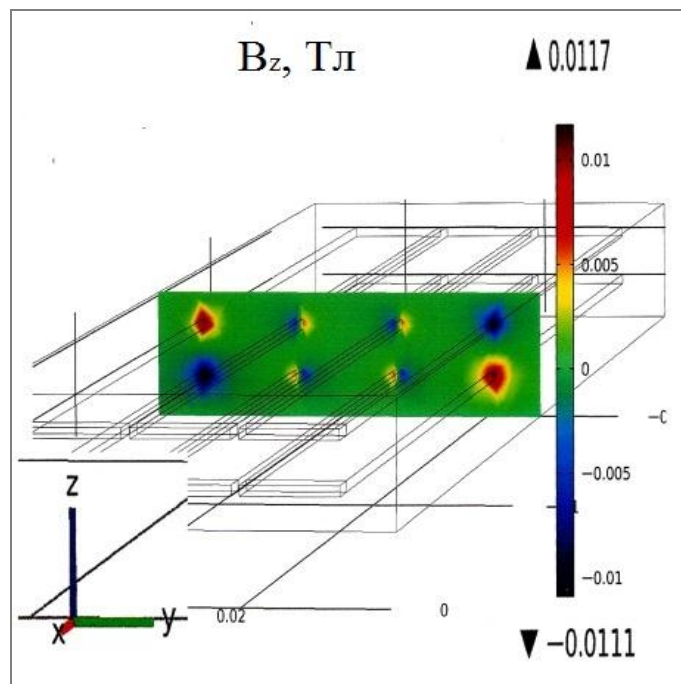
Шунтирование крайних лент крайних витков дополнительными лентами позволило поднять действующее значение токонесущей способности всей конструкции с 450А до 550А для 3 параллельных лент. На рисунке 3.8 а показаны действующие значения переменного тока в 3-витковом макете без дополнительных лент, с одной дополнительной лентой и с двумя дополнительными лентами. На рисунке 3.8 б показана зависимость потерь в 3-витковом макете от действующего значения тока без дополнительных лент и с двумя дополнительными лентами на крайних витках.



а)

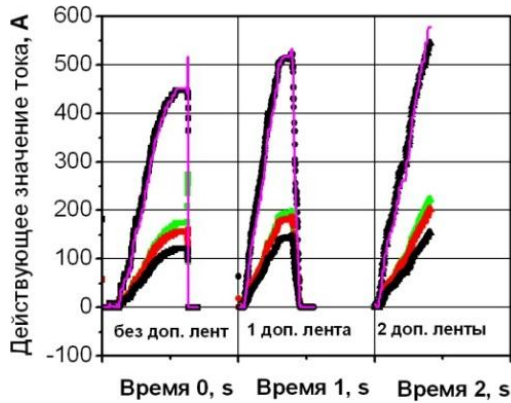


б)

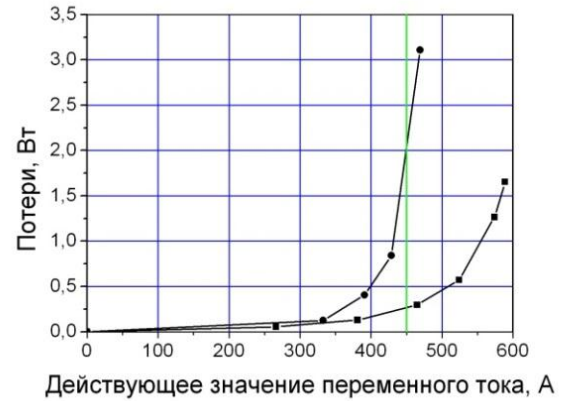


в)

Рисунок 3.7 – Радиальное (перпендикулярное ленте) поле 0,02-0,03 Тл около обмоток внутренних пар катушек 27,5 кВ СОТ (а); распределение поля в сечении 3-виткового макета, рассчитанное методом конечных элементов (б); распределение перпендикулярного поля для двух параллельных 3-ленточных проводников со встречными токами по 250 А в каждой ленте (в)



а)



б)

Рисунок 3.8 – Общий ток и токи лент в 3-витковом макете без дополнительных лент, с одной дополнительной лентой и с двумя дополнительными лентами на краях (а); потери на переменном токе с дополнительными лентами и без них (б)

На рисунке 3.8 а видно, что добавление ВТСП лент на края 3-виткового макета увеличило его токонесущую способность на переменном токе с 450 до 550 А. Кроме того, при добавлении двух лент перестали возникать тепловые срывы, которые были на макете без дополнительных лент и с одной дополнительной лентой, на не шунтированных краях. Уменьшение потерь на переменном токе с добавлением шунтирующих лент видно на рисунке 3.8 б. Учитывая предполагаемые условия работы СОР (рисунок 2.1), потери на номинальном токе (900А) составляют 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 ТНЭ в данном проекте незначительна.

Выводы по главе 3:

1. Общая токнесущая способность изготовленных макетов из нескольких параллельных лент близка к сумме критических токов лент. Достигнута токнесущая способность ТНЭ из 6 ВТСП лент, необходимая для СОТ с 900 А номинального тока.
2. 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.
3. Потери в ВТСП ТНЭ СОТ на переменном токе возникают на краях обмоток или на участках лент с пониженной токнесущей способностью. Потери при рабочем токе много ниже номинального незначительны.
4. Дополнительная ВТСП лента на крайних витках компенсирует влияние пиков собственного поля на краях, снижает потери и увеличивает максимальный ток устройства.
5. Методики численного моделирования СОТ, проверенные при обсчете экспериментов, позволяют моделировать различные режимы работы СОТ.
6. Экспериментальное автоматизированное намоточное устройство обеспечивает изготовление обмоток СОТ для рассмотренного проекта.

4 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ ГИБКИХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ТНЭ МАЛОГО ДИАМЕТРА

4.1 Технические требования к гибкому сильноточному ТНЭ

Для многих перспективных ВТСП магнитов и электроэнергетических устройств:

- термоядерных и гибридных реакторов;
- плазменных безэлектродных межорбитальных двигателей;
- импульсных магнитов, включая СПИН;
- крупных магнитов для индустриальной физики;
- магнитных систем радиационной защиты космических аппаратов;
- ускорителей частиц;
- электромашин;
- МГД генераторов и двигателей;
- индуктивных СОР;
- гибких токоподводов,

понадобятся ТНЭ с рабочими токами, превышающими максимальные токи единичных ВТСП лент в десятки и даже сотни раз.

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

1. ТНЭ должны иметь высокие рабочие токи, причем из экономических соображений ТНЭ должны иметь ток, близкий к сумме токов лент, и коэффициент использования ленты по длине и ширине, близкий к единице. Этому требованию удовлетворяет ТНЭ, состоящий из прямых лент или спиралей с острым углом намотки.
2. Для магнитных систем в первую очередь важна механическая устойчивость под действием растягивающих и сдвигающих сил. Поэтому ТНЭ должен иметь плотную, но в то же время не жесткую структуру, в которой силы распределяются на всю поверхность ВТСП лент. В то же время ВТСП

ленты должны иметь некоторую подвижность относительно друг друга и формера в продольном направлении. Для всех применений важна способность ТНЭ к изгибу с минимальным радиусом от нескольких сантиметров до десятков сантиметров. Для изгиба с радиусом меньше ~1 метра ВТСП ленты должны скользить друг относительно друга. Для токоподводов имеет значение «самонесущая» конструкция ТНЭ, обеспечиваемая формером или кондуитом. Спиральная укладка ВТСП лент обеспечивает гораздо более высокую устойчивость к растяжению, чем у ленты или стопки лент, поскольку продольная деформация ТНЭ не передается на ВТСП ленты непосредственно.

3. Допустимый уровень потерь в переменных и импульсных режимах может быть обеспечен транспонированием ВТСП лент в ТНЭ, полным или частичным, с минимальным шагом. Транспонирование позволяет минимизировать потери в изменяющихся внешних полях и обеспечивает достаточно низкий уровень тепловых возмущений для создания термодинамической стабильности. Частичное транспонирование конструктивно определяется 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 на любой локальной неоднородности. В частности, это помогает решить проблему «горячих пятен», вызываемых встречающимися падениями криттока лент на малой длине.
4. Термодинамическая стабильность, то есть устойчивость ТНЭ к энергетическим возмущениям, выдвигает требования по достаточному количеству нормального металла (меди) в сечении ТНЭ, эффективности охлаждения ТНЭ и возможности перераспределения тока по сечению между ВТСП и нормальным металлом. Эти требования можно удовлетворить

благодаря наличию полого неизолированного медного формера с каналами для охлаждения в центре ТНЭ.

5. Технологичность изготовления и применения ТНЭ. Для эффективного применения в большинстве крупных устройств и токоподводов желательно предусмотреть возможность проточного охлаждения на уровне 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). Желательно, чтобы конструкция ТНЭ и технология изготовления позволяла усилить любое из перечисленных в пунктах 1-4 качеств.

Геликоидальная конструкция ТНЭ с круглым или плоским закругленным формером, имеющим внутренние каналы может обеспечить одновременное соответствие наибольшему числу приведенных требований. Сравнение проводилось с такими конструкциями, как рёбель, стопка лент, твистированная или прямая, различные конструкции ТНЭ из многих рёбелей и стопок лент.

Преимущество геликоидального ТНЭ перед рёбелем и конструкциями на его основе заключается прежде всего в устойчивости к пондеромоторным силам и, кроме того, в коэффициенте использования ВТСП ленты. Преимущество перед твистированными стопками лент и ТНЭ на их основе – в меньшем шаге транспонирования, а также в том, что твистированным стопкам нужен довольно сложный conduit, и даже при этом они находятся в магнитных системах в сложных условиях с точки зрения механической устойчивости (и сильно теряют в плотности тока). При одинаковом рабочем токе влияние собственного поля геликоидального ТНЭ наименьшее (оно тангенциально). Геликоидальный ТНЭ с полым формером – одна из немногих конструкций ТНЭ, в которой естественным образом решаются вопросы охлаждения, стабилизации и перераспределения токов между лентами.

Разработка ТНЭ требует комплексного исследования параметров ВТСП лент и образцов ТНЭ. Необходимы исследования токонесущей способности на

постоянном токе и потерь в переменных режимах, в собственном поле и во внешних полях, при различных температурах. Желательно исследовать влияние деформации на эти параметры, а также исследовать термодинамическую стабильность ТНЭ при воздействии различных тепловых и механических возмущений.

4.2 Разработка методик для исследования лент и ТНЭ

Установка для исследования ВТСП лент и ТНЭ на постоянном и переменном токе 50 Гц в жидком азоте во внешнем магнитном поле состоит из:

- источника опорного поля с горизонтальным полем (резистивный магнит со стальным магнитопроводом);
- зонда, с максимально возможным током до 400 А, с измерительной частью до 10 см в высоту, до 20 мм в ширину и с датчиком Холла;
- зондов для ТНЭ с токами до 10 кА;
- азотного криостата и опоры под зонд, позволяющей с точностью до градуса выставлять угол между образцом и полем, контролируя начальный угол по датчику Холла;
- источника питания постоянного и импульсного тока до 21 кА;
- источников питания постоянного тока (до 1000 А полупроводниковых и генератор до 5 кА);
- ЛАТР и понижающего трансформатора для питания образца током 50 Гц;
- понижающего трансформатора и батареи конденсаторов, образующих вместе с магнитом резонансный контур для питания магнита переменным током 50 Гц (до 750 А, что соответствует 0,9 Тл);
- нановольтметров для измерения потенциала образца на постоянном токе;
- усилителей с гальванической развязкой для измерения потенциала образца на переменном токе и на высоком уровне ВАХ на импульсном токе;
- многоканального быстродействующего АЦП и персонального компьютера для регистрации и обработки данных.

Потенциальные выводы припаивались к 100 мм участку в середине образцов ВСП ТНЭ, ко всей сверхпроводящей части образцов и к краям токовых терминалов для измерения их сопротивления. При исследовании ВСП лент измерялись потенциалы на участках 50 мм и 100 мм. На постоянном токе питание осуществлялось полупроводниковыми источниками тока до 2 кА при 77К, электрогенератором постоянного тока до 5 кА и, впоследствии, полупроводниковыми источниками постоянного или импульсного тока до 4500 А. Питание переменным током производилось при помощи регулируемого трансформатора. Измерения потенциалов на постоянном токе осуществлялись нановольтметрами, а на переменном и импульсном токе – быстродействующими усилителями. Запись данных осуществлялась системой автоматической регистрации данных.

Транспортные потери на переменном токе вычислялись по вольтамперным характеристикам за цикл одинаковым образом для одиночной ВСП ленты и для образцов ТНЭ, как в собственном, так и во внешнем, синхронно изменяющемся с током магнитном поле.

Напряжения с потенциальных выводов интегрировались численно по времени за цикл, чтобы обнулить индуктивную составляющую и выделить компоненту, соответствующую потерям. Полученный интеграл от времени численно интегрировался по току за цикл, полученные потери за цикл умножались на частоту. Из нескольких циклов с различной амплитудой тока получалась зависимость транспортных потерь на переменном токе от амплитуды тока.

Методика позволяет исследовать ВСП ленты в постоянных полях до 1,1 Тл и в переменных до 0,8 Тл при температуре 77К и регистрировать уровни напряженности электрического поля от 0,1 мкВ/см на постоянном токе и от 1 мкВ/см на переменном.

Также для исследования зависимости токонесущей способности ВСП ленты от деформации применялся специальный зонд с балкой равного сопротивления, на которую напаивались ленты. Балка может быть изгибаема на

заданную величину в жидком азоте в поле под током, при этом ленты равномерно деформируются, одна на сжатие, другая на растяжение.

Для исследования токонесущих элементов в азоте при 77 К дополнительно применялись:

- зонд с током до 2 кА;
- параллельное включение двух килоамперных источников тока (исследования в поле собственного тока образцов);
- криостат большого диаметра для исследования согнутых длинномерных образцов;
- последовательное питание образца и источника опорного поля переменным током при помощи резонансного контура.

Эти же методики были использованы для исследования лент и ТНЭ для резистивных СОТ (за исключением описанной во 2-й главе методики исследования распределения токов).

Для исследования токонесущих элементов и лент в жидком гелии при 4.2 К в перпендикулярном поле дополнительно были задействованы: НТСП магнит с горизонтальным полем до 10 Тл в криостате, зонд с током до 10 кА для исследования ТНЭ. Питание образцов осуществлялось от 5 кА генератора постоянного тока.

Для исследования токонесущих элементов и лент в азоте при 65 К зонды помещались в герметичный криостат, при этом пары азота откачивались.

4.3 Предварительные исследования ВТСП лент для применения в геликоидальных токонесущих элементах

Для рассмотрения возможности применения в геликоидальных ТНЭ были изначально отобраны 3 типа ВТСП лент 2-го поколения, стабилизированных медью (Таблица 4.1). Исследования лент были произведены на вышеописанном испытательном комплексе. Измерены:

1. Вольтамперные характеристики нескольких коротких прямых образцов лент на постоянном токе при 77 К в жидком азоте в поле собственного тока (рисунок 4.1 б). Критический ток измерялся по критерию 1 мкВ/см и 10 мкВ/см. Произведена примерная оценка разброса значений критических токов по длине партий ленты для лент SuperPower и SuNAM (Таблица 4.1).

Таблица 4.1 –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%

2. Для ленты SuperPower SCS4050 AP – зависимость тока при 1 мкВ/см от деформации сжатия и растяжения во внешнем перпендикулярном поле 0.5 Тл при температуре 77 К в жидком азоте (Рисунок 4.1 а).
3. Вольтамперные характеристики лент, намотанных на трубку диаметром 5 мм геликоидально с шагом ~15 мм сверхпроводящим слоем вниз и сверхпроводящим слоем вверх (Рисунок 4.1 б).
4. Зависимости токонесущей способности лент SuperPower и SuNAM от величины внешнего поля, перпендикулярного оси ленты и перпендикулярного либо параллельного поверхности ленты (Рисунок 4.2 а) до 0.6 Тл при 77 К в жидком азоте.
5. Зависимости токонесущей способности лент SuperPower и SuNAM от угла внешнего поля 0.1 и 0.5 Тл, перпендикулярного оси ленты и вращающегося в плоскости, перпендикулярной оси ленты (Рисунок 4.2 б) при 77 К в жидком азоте.

6. Вольтамперные характеристики ленты SuperPower на токе 50 Гц в поле собственного тока при 77 К в жидком азоте. Вычислена зависимость транспортных потерь от амплитуды переменного тока (см. сравнительные данные в разделе про ТНЭ).
7. Для лент SuNAM – значения тока при 1 мкВ/см во внешних полях несколько тесла, перпендикулярных оси лент и направленных различным образом к поверхности лент, в жидком гелии при 4.2 К
8. Вольтамперные характеристики ленты SuperPower при 65 К в жидком азоте под откачкой в поле собственного тока (Рисунок 4.3).

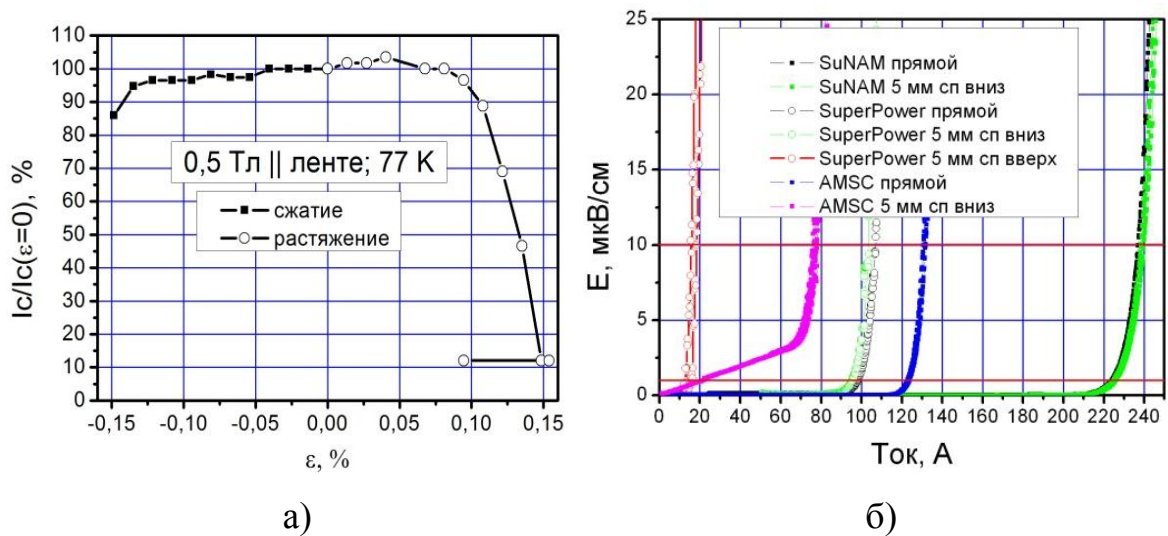


Рисунок 4.1 – Зависимость токонесущей способности от деформации для SCS4050 AP (а); VAX лент, геликоидально намотанных на трубку $\Phi 6$ мм с шагом ~ 18 мм (б)

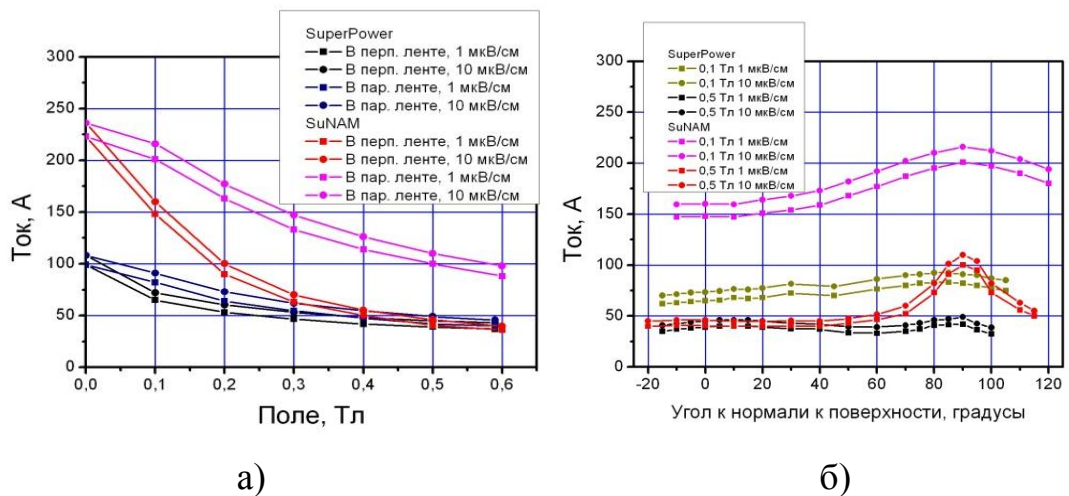


Рисунок 4.2 – Полевая зависимость криттока лент при 77 К (а); анизотропия криттока лент при 77 К (б) в поле, перпендикулярном оси лент

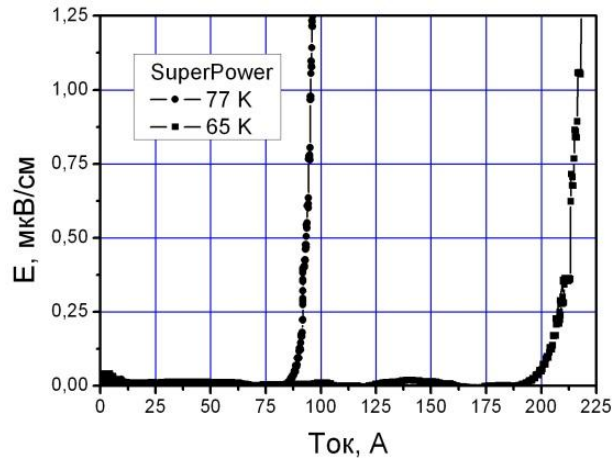


Рисунок 4.3 – Вольтамперные характеристики ленты SuperPower SCS 4050 AP при 65 К и 77 К

По результатам исследования ВТСП лент сделаны выводы:

1. Токонесущая способность лент 2-го поколения меньше снижается при одинаковой амплитуде деформации при условиях сжатия ВТСП слоя, чем в случае его растяжения.
2. Предельная деформация (деформация, вызывающая необратимую деградацию токонесущей способности) сжатия ВТСП слоя гораздо больше, чем предельная деформация растяжения.
3. При геликоидальной намотке деградация критического тока обусловлена продольной деформацией ВТСП слоя, поперечная деформация влияет только при вызывании ею необратимой деградации.
4. При геликоидальной намотке на малый диаметр сверхпроводящим слоем вниз ВТСП ленты 2-го поколения не деградируют или деградируют меньше, чем при такой же намотке сверхпроводником вверх.
5. Ленты SuperPower и SuNAM подходят для такой намотки, поскольку не деградируют, ленты с толстой подложкой, такие, как AMSC, деградируют и не подходят для геликоидального ТНЭ малого диаметра.
6. Ленты с подложкой ~50-60 микрон (и более тонкой), вероятно, подходят для геликоидального ТНЭ малого диаметра при намотке сверхпроводником вниз.

7. Ленты со 100 микронной или более толстой подложкой не подходят для геликоидального ТНЭ столь малого диаметра, поскольку деформация сжатия ВТСП слоя слишком велика.
8. Зависимость токонесущей способности ленты SuperPower от внешнего магнитного поля гораздо менее сильна и анизотропна, чем у ленты SuNAM, благодаря искусственным центрам пиннинга в первой. Из-за этого лента SuperPower SCS4050 AP лучше подходит для ТНЭ высокополевых применений, а лента SuNAM – для применений ТНЭ в малых полях с большой токонесущей способностью. Граница между этими областями для исследованных партий лент проходит примерно при значениях поля 0,6 Тл при 77 К и 6-8 Тл при 4,2 К, когда токи лент уравниваются. Для других ВТСП лент, в том числе более новых лент этих производителей, необходимо производить измерения полевых зависимостей, чтобы более точно определить области наилучшей применимости.

4.4 Разработка конструкции и изготовление образцов геликоидального ТНЭ

Формер обеспечивает механическую устойчивость ТНЭ при нагрузках в продольном и поперечном направлении и, одновременно, гибкость. Он также не должен повышать уровень потерь в ТНЭ. Первые образцы ТНЭ предназначены для исследований как с точки зрения применения на постоянном токе, так и в переменных режимах. Поэтому для первых образцов были изготовлены формеры, плотно скрученные из 3000 проволок (нержавеющая сталь) диаметром 0,1 мм. Эти формеры были изолированы в целях повышения гладкости поверхности и уменьшения потерь. В перспективе рассматриваются различные конструкции формеров: с добавлением медных волокон и других волокон с хорошей тепло- и электропроводностью, с обкруткой медной фольгой вместо изоляции и с применением полых формеров для проточного охлаждения ТНЭ.

Разработка технологии изготовления образцов проведена исходя из следующих требований:

- отсутствие деградации токонесущей способности лент при намотке;
- плотность укладки лент на формер;
- намотка параллельными лентами всего слоя за проход;
- автоматизация процесса намотки;
- возможность выбора шага транспонирования и числа лент;
- возможность изготовления образцов с различными конструкциями токовых контактов и креплений.

Из первых трех соображений натяжение лент предложено осуществлять независимое, регулируемое и не превышающее предельного натяжения, указываемого в документации на ленту. Формер выполняет функцию ведущего вала, а отдающие валы с лентами движутся параллельно формеру и пропорционально скорости его вращения. Этот коэффициент пропорциональности должен быть задаваемым программно для регулирования шага транспонирования.

Управление движением отдающей части необходимо осуществлять автоматически при помощи программируемого устройства.

Угол намотки лент должен также регулироваться в зависимости от шага транспонирования и диаметра формера. Произведен расчет соотношений углов, диаметров и шага транспонирования, а также расчет соотношения скоростей вращения приемной и движения отдающей частей намоточного устройства.

Проработаны вопросы крепления формера во время намотки и присоединения лент к токовым контактам с целью механического крепления лент и ввода в них тока.

Для образцов с токовыми контактами в виде медных конусов – конусы припаиваются к формерам, а вся конструкция крепится на ведущем валу устройства за резьбу на конусах. Ленты припаиваются к конусам с одного конца перед намоткой слоя, с другого – после намотки. Ток в ленты заводится через медные конусы со стороны сверхпроводящего слоя и с другой стороны через гибкие многожильные медные кабели.

Для образца с токовыми контактами без медных конусов ленты первого слоя припаиваются к формеру, ленты следующих слоев – к предыдущему слою так, чтобы часть предыдущего слоя оставалась открытой. Ток в каждый слой заводится сверху через открытый участок гибкими многожильными медными кабелями. Температура припоя выбирается ниже максимальной температуры лент, указанной производителем. Используемый флюс не должен разъедать медное покрытие лент. Все ленты наматываются сверхпроводящим слоем вниз. Образцы в процессе изготовления на намоточном устройстве продемонстрированы на рисунке 4.6.

4.5 Расчет конструкции (геометрии) образцов ТНЭ

Для геликоидальной намотки ВТСП лент на формер при помощи намоточного устройства необходимо рассчитать шаг намотки, угол намотки и зазоры между лентами в каждом слое лент, исходя из требуемого количества лент, а также размеров формера и лент. На рисунке 4.4 приведена схема расчета геометрических параметров ТНЭ при геликоидальной намотке четырех ВТСП лент с зазорами на круглый формер.

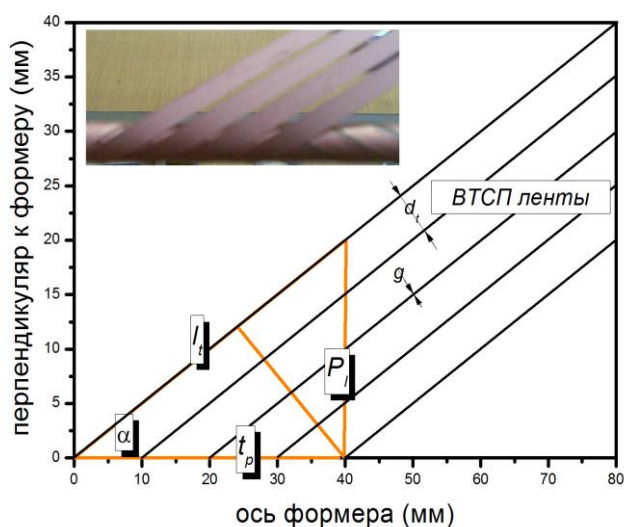


Рисунок 4.4 – Схема расчета геометрии геликоидального ТНЭ, в данном случае по 4 ленты в слое; на вставке – фотография процесса намотки 2-го слоя

Периметр слоя лент (круглый формер, середина толщины ленты):

$$P_l = \pi \cdot D_m, \quad (4.1)$$

Угол ВТСП лент к оси формера:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{n \cdot (d_t + g)}{P_l}\right), \quad (4.2)$$

Длина ВТСП ленты на один виток и шаг намотки соответственно

$$l_t = P_l \cdot \sin \alpha, \quad t_p = l_t \cdot \cos \alpha, \quad (4.3)$$

где P_l – периметр слоя (по среднему диаметру намотки ВТСП ленты в слое),

n – число лент в слое,

N – номер слоя,

d_t – толщина ленты,

w_t – ширина ленты,

g – зазор между лентами в слое,

α – угол намотки лент к оси формера,

t_p – шаг намотки (частичного транспонирования),

l_t – длина лент в витке,

D_m и D_{out} – диаметр середины слоя и внешний диаметр соответственно,

R_b – минимальный радиус изгиба ТНЭ:

$$R_b = \frac{D_m}{2} \cdot \frac{(d_t + g)}{g}, \quad (4.4)$$

Перед намоткой слоя ВТСП лент на автоматизированном устройстве необходимо задать программно шаг намотки, а также выставить угол намотки и зазоры между лентами.

Радиус минимального изгиба ТНЭ без уменьшения токонесущей способности определяется минимальной шириной зазоров между ВТСП лентами слоя, поскольку при изгибе ТНЭ ВТСП ленты скользят по формеру или по предыдущему слою. Зазор между лентами на внутренней стороне сгиба ТНЭ

уменьшается, и когда он становится равен нулю, дальнейший сгиб невозможен без деформации лент.

В качестве минимального безопасного радиуса изгиба ТНЭ выбирается радиус безопасного изгиба того из слоев, у которого он максимален.

ТНЭ не круглого (овально-плоского) сечения, при любом числе слоев и лент, рассчитываются аналогично, только диаметры применимы к закруглениям формера.

Первый образец был намотан на формер из нержавеющей стали с углом намотки 45° на устройстве для изготовления коротких образцов. Так же, но с углом намотки 30° , были намотаны 2-й и 3-й образцы (Таблица 4.4). Углы намотки всех слоев выставлялись одинаковые, что не помешало намотать ленты 2-го и 3-го образцов с зазорами. Видимо, угол в диапазоне $\sim 1^\circ$ корректировался изгибом формера и ленты. 1-й образец был изготовлен без зазоров, на гибкость не исследовался, хотя и сгибался на радиусы порядка 0,5 м при монтаже.

Геометрия приведенных ниже образцов (Таблицы 4.2 и 4.3) учитывает возможность их изготовления на намоточном устройстве для длинных кусков ТНЭ, путем намотки на твердые формеры. Из соображений проточного охлаждения можно использовать медные трубки. Углы намотки должны быть соблюдены с большей точностью и должны меняться от слоя к слою, что на данном устройстве предусмотрено конструкцией.

Таблица 4.2 – Образцы из 16 лент SuNAM в 4 слоя

№ слоя	Периметр, мм	Угол, °	Длина витка, мм	Шаг намотки, мм	Зазор, мм	Радиус изгиба, мм	Радиус середины, мм	Внешний радиус, мм
1	20,33	32,2	38,12	32,2	0,1	71,1	6,47	6,59
2	21,08	33,4	38,28	31,9	0,2	38,5	6,71	6,83
3	21,84	34,5	38,55	31,8	0,3	27,8	6,95	7,07
4	22,59	35,5	38,92	31,7	0,4	22,4	7,19	7,31

Таблица 4.3 – Образцы из 16 лент SuperPower в 4 слоя

№ слоя	Периметр, мм	Угол, °	Длина витка, мм	Шаг намотки, мм	Зазор, мм	Радиус изгиба, мм	Радиус середины, мм	Внешний радиус, мм
1	20,30	34,1	36,15	29,9	0,15	48,5	6,46	6,57
2	20,99	34,9	36,61	30	0,25	31,4	6,68	6,79
3	21,68	34,8	37,96	31,1	0,4	21,6	6,9	7,01
4	22,37	35,6	38,46	31,3	0,5	18,5	7,12	7,23

4.6 Разработка устройства для изготовления коротких образцов ТНЭ

Исходя из приведенных выше технических требований, было разработано и изготовлено намоточное устройство для намотки коротких (до 1 м) образцов. Его конструкция аналогична ранее применявшейся для намотки модулей и экспериментальных образцов ТНЭ резистивного СОТ.

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, синхронизация происходит по сигналу обратной связи, поступающего с инкрементального оптического энкодера (датчика угла поворота). Перемещение отдающей части пропорционально количеству импульсов энкодера (углу поворота), коэффициент пропорциональности задается программно. 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.

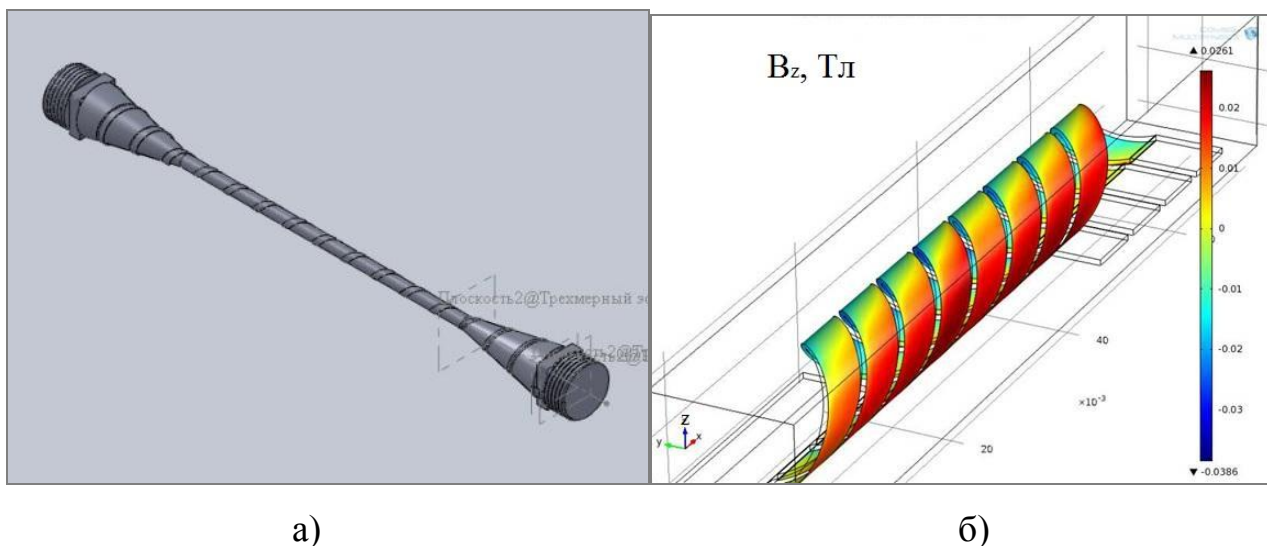


Рисунок 4.5 – Принцип намотки ленты (а); Расчет влияния поля собственного тока для одного слоя из 4 лент (влияние краевых эффектов уничтожается медными конусами токовводов) (б)

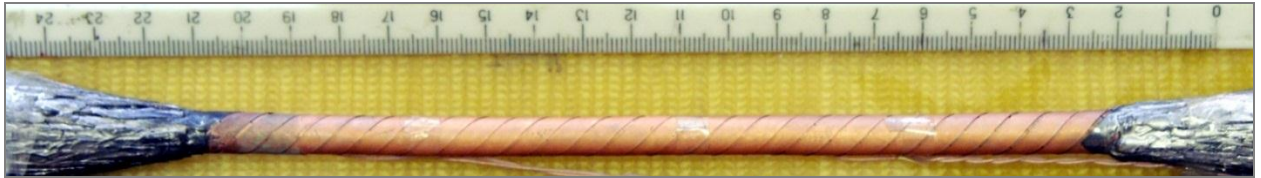


Рисунок 4.6 – Процесс намотки слоя из 4 лент 2-м слоем (а) и на формер (б)

Были намотаны 3 коротких образца (см. таблицу 4.4 и рисунок 4.7) на гибких формерах из нержавеющей стали, изготовленных в виде плотно скрученных тросов из 3000 нитей диаметром 0,1 мм. Позднее были изготовлены еще 2 образца – 10-метровый и контрольный короткий – на формере в виде медной трубки.

Таблица 4.4 – Изготовленные образцы ТНЭ

№ обр.	Лента	Число лент	Число слоев	Длина	Шаг, мм	Угол	Диаметр формера	Расход ленты на 1 м ТНЭ
1.1	SuperPower SCS 4050 AP	4	1	200 мм	23	45°	7 мм	5,6 м
1.1i		4	1 (изол)					
1.2		8	2					
1.3		16	4					
2	SuperPower SCS 4050 AP	16	4	750 мм	36	30°	6,5 мм	19 м
3	SuNAM	8	2	170 мм	36	30°	6,5 мм	9,5 м
4	SuperPower SCS 4050 AP	16	4	1 м	30	27°	6,34 мм	19 м
5	SuperPower SCS 4050 AP	16	4	10 м	30	27°	6,34 мм	19 м



а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.7 – Короткие образцы ТНЭ: 1-й тот же образец из 16 лент, 4 слоя (а); образец из 16 лент длиной 75 см (б); образец из 16 лент длиной 75 см согнутый на диаметр 290 мм (в); кабель из 8 лент SuNAM, его токовый терминал (г)

4.7 Комплексные исследования коротких образцов ТНЭ

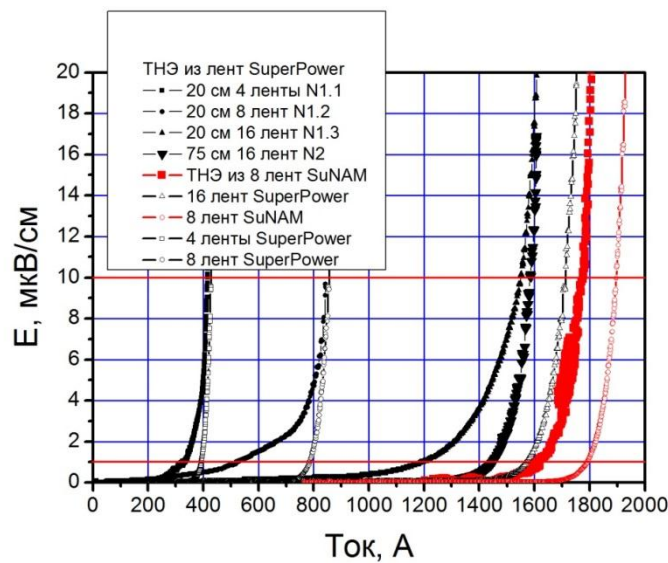
Исследованы образцы (Таблица 4.4) N1 длиной 20 см из 4, 8 и 16 лент (образец доматывался после каждого цикла исследований), образец N2 длиной 75 см из 16 лент, согнутый на диаметр 290 мм, образец N3 длиной 17 см из 8 лент SuNAM. Проведены измерения:

1. Вольтамперных характеристик образцов N1 (с 4, 8 и 16 лентами), N2 и N3 на постоянном токе в поле собственного тока при температуре 77 К в жидком азоте (Рисунок 4.8 а).
2. Вольтамперных характеристик образцов N1 (с 4, 8 и 16 лентами) и N2 на переменном токе 50 Гц в поле собственного тока при температуре 77 К в жидком азоте. Вычислена зависимость транспортных потерь от амплитуды тока, которая сравнивается с потерями в соответствующем количестве ленты (Рисунок 4.8 б).
3. Вольтамперных характеристик образца N1 (с 4, 8 и 16 лентами) на переменном токе 50 Гц во внешнем поле, изменяющемся синхронно с током, при температуре 77 К в жидком азоте. Вычислена зависимость транспортных потерь от амплитуды тока (Рисунок 4.10 а).
4. Для образца N1 из 4 лент, изолированного 2-мя слоями каптона, проведены измерения ВАХ на постоянном токе и потерь на переменном токе, результаты которых сравниваются с таковыми для неизолированного образца (Рисунки 4.11 а, б и 4.12 а).
5. Полевой зависимости тока при 10 мкВ/см образца N1 (с 16 лентами) во внешнем перпендикулярном постоянном поле до 0.6 Тл при температуре 77 К в жидком азоте (Рисунок 4.10 б).
6. Вольтамперных характеристик образцов N1 (с 16 лентами) и N3 на постоянном токе в поле собственного тока при температуре 65 К в жидком азоте под откачкой (Рисунок 4.9 а).

7. Вольтамперной характеристики на постоянном токе образца N1 (с 16 лентами) в перпендикулярном внешнем поле 7.7 Тл при температуре 4.2 К в жидком гелии (Рисунок 4.9 б).

8. Вольтамперных характеристик образца N3, согнутого на диаметр 310 мм, а также после распрямления (ВАХ совпали в ВАХ до сгиба), в поле собственного тока при 77 К.

При всех исследованиях на постоянном токе измерялись сопротивления токовых терминалов (Таблица 4.5).



а)

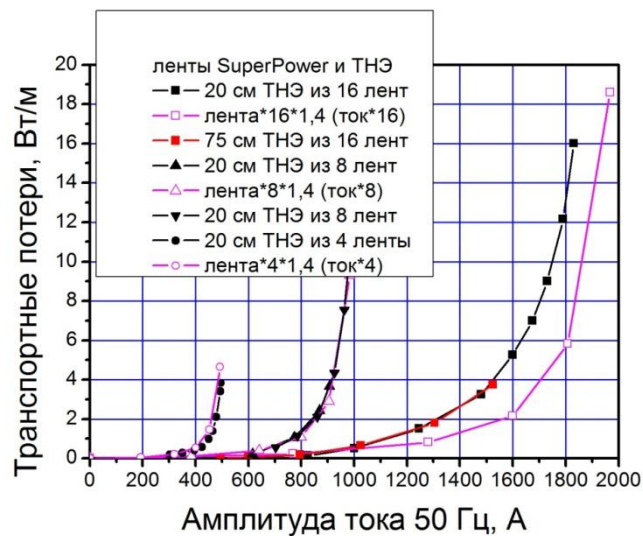


Рисунок 4.8 – Сравнение ВАХ различных образцов ТНЭ и ВТСП лент, нормированных на число лент в кабеле (а); Сравнение транспортных потерь на токе 50 Гц в ТНЭ и в соответствующем ТНЭ количестве ВТСП лент (б)

Токонесущая способность образцов ТНЭ при 77К в собственном поле на постоянном токе меньше суммы токов лент на величины до 7%, из-за перераспределения токов, разброса токонесущей способности лент по длине (Таблица 4.4) и влияния собственного поля. Расчет собственного поля был произведен методом конечных элементов, оценка его влияния согласуется с данными измерений.

Линейный участок ВАХ образца N1 из 16 лент от 1000 до 1400 А соответствует перераспределению токов между лентами. Величина тока на 10 мкВ/см составляет 1600 А. У образца N2 контакты значительно однороднее, сам он – длиннее, поэтому на ВАХ практически не видно линейной части, вызванной перетеканием.

На постоянном токе разница обусловлена перераспределением тока между лентами – длина образца 1 меньше, а однородность спая хуже, чем у образца 2, поэтому распределение тока происходит в образце N1 до 4 мкВ/см, а в образце N2 – до 0,5-1 мкВ/см. На переменном токе распределение токов определяется индуктивностями отдельных лент. Они равны из-за симметрии конструкции. Поэтому на переменном токе распределение равномерно и зависимости потерь образцов близки по величине в исследованном диапазоне токов.

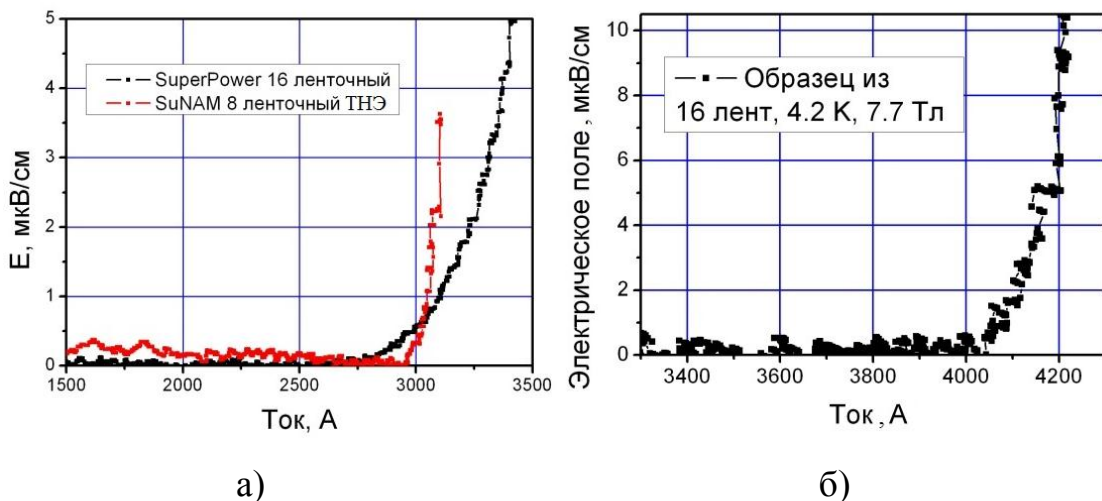


Рисунок 4.9 – ВАХ ТНЭ в жидком азоте под откачкой при 65 К (а); ВАХ образца N1 в жидком гелии в перпендикулярном внешнем поле (б)

Транспортные потери, в основном, обусловлены ВАХ и гистерезисными потерями от собственного поля, поэтому потери на цикл ввода-вывода тока с данной амплитудой составляют 1/100 мощности потерь на 50Гц, кроме области амплитуд тока “с разогревом”, в данном случае >1600 А.

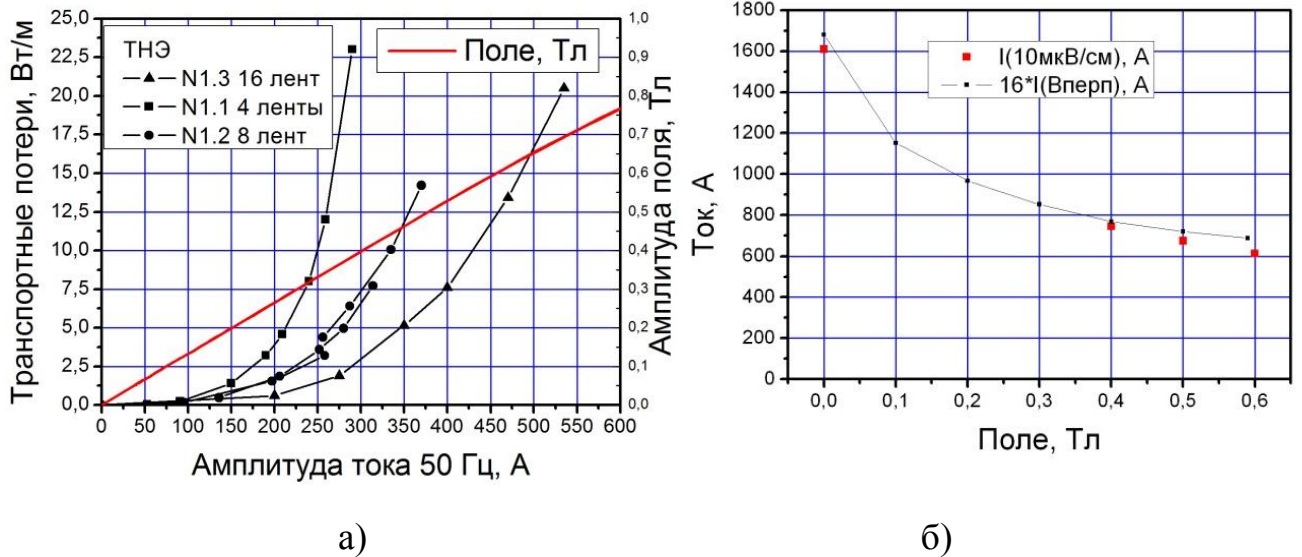


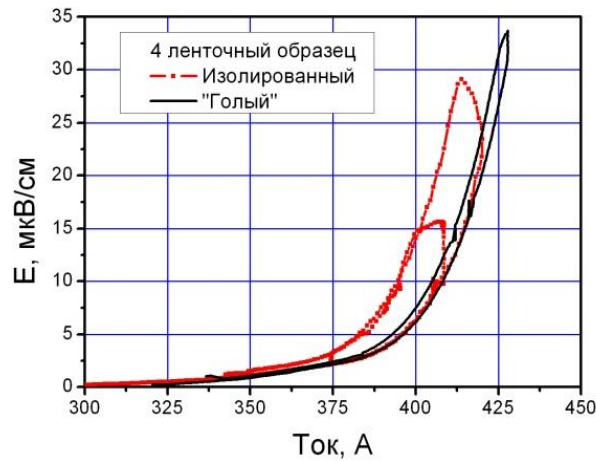
Рисунок 4.10 – Потери от транспортного тока в синхронно изменяющемся поле 50Гц (а); полевая зависимость критического тока образца ТНЭ N1 и 16 лент в перпендикулярном поле (б)

Видно, что кривая полевой зависимости ТНЭ (Рисунок 4.10 б) проходит несколько ниже, чем 16 лент в перпендикулярном поле. Это происходит из-за поля тока обратного токоввода, а также из-за поля собственного тока ТНЭ.

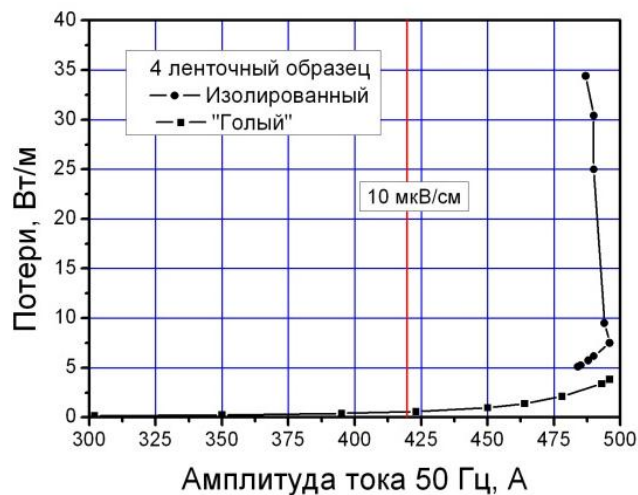
Данные эксперименты показали, что можно с достаточной точностью оценивать токонесущую способность ТНЭ в широком диапазоне полей и температур по данным для лент. В жидком гелии в поле нескольких Тл ток образца равен сумме токов лент, по полевой зависимости критического тока, приведенной в [65].

Таблица 4.5 – Измерение сопротивления токовых терминалов при различных температура

№ образца по таблице 2	Лента	Т-ра, К	Ток, А	Сопротивление терминалов, мкОм
1	SuperPower	77	1580 (10мкВ/см)	0,3-07
1	SuperPower	65	3100 (1 мкВ/см)	0,2-0,5
1	SuperPower	4,2	4070/4210 7,7 Тл	<0,02
2	SuperPower	77	1600 (10мкВ/см)	~0,15
3	SuNAM	77	1640 (1 мкВ/см)	1,5-2
3	SuNAM	65	3050 (1 мкВ/см)	1-1,3



а)



б)

Рисунок 4.11 – Сравнение ВАХ изолированного и не изолированного образцов (а); сравнение транспортных потерь изолированного и неизолированного образца (б)

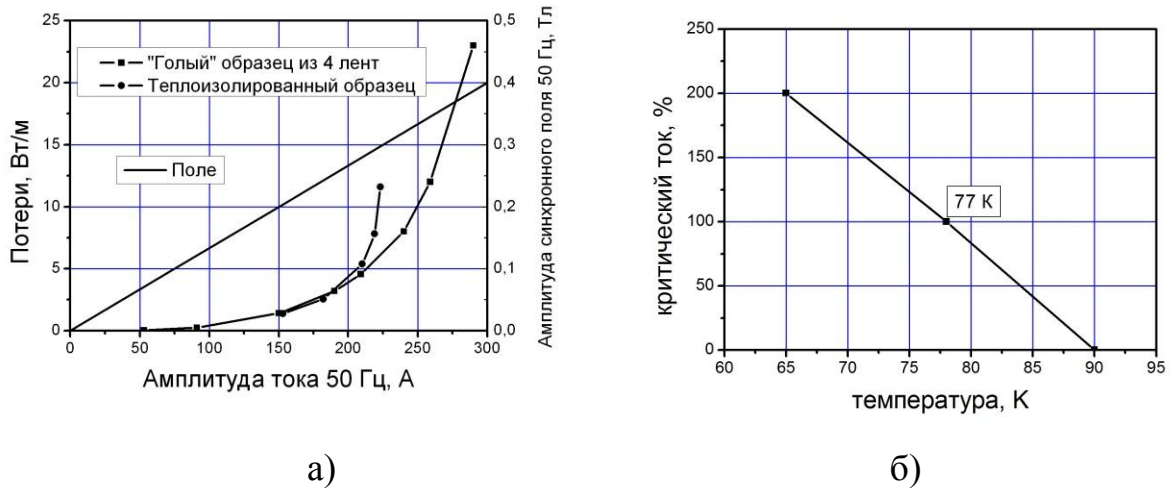


Рисунок 3.12 – Сравнение транспортных потерь в изолированном и неизолированном 4 ленточном образце в синхронном поле (а); температурная зависимость токонесущей способности ленты для оценки нагрева ВТСП слоя по гистерезису ВАХ (б)

4.8 Механические испытания на разрывной машине

Образец на той же оправке радиусом 150 мм был подвергнут механическому испытанию на разрывной машине (Рисунок 4.13). Образец, находящийся в жидком азоте при 77К, натягивался за токовые терминалы с одной стороны и за оправку с другой, с усилием до 100 кг. При данной методике испытаний ТНЭ прижимается к оправке с одновременным растягиванием, имитируя нагрузку при намотке и, отчасти, нагрузку в обмотке магнитной системы. При различных усилиях, вплоть до максимального, измерялись вольтамперные характеристики. Не обнаружено никакой деградации токонесущей способности вплоть до усилия 100 кг, максимального в данном эксперименте (а также максимально возможного на намоточном устройстве). Поскольку это испытание было произведено при более жестких условиях, чем намотка – при криогенных температурах, оно подтверждает, что ТНЭ данной конструкции гарантированно выдержит намотку с натяжением до 100 кг на диаметр, больший чем 300 мм.

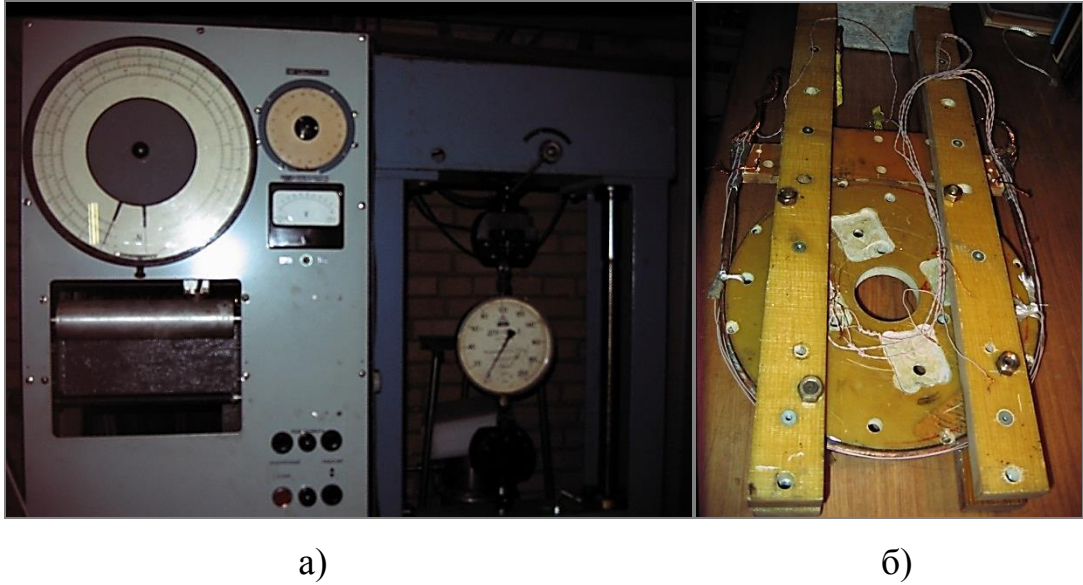


Рисунок 3.13 – Разрывная машина (а); образец на зонде для механических испытаний (б)

4.9 Оценка коэффициента теплоотдачи в жидкий азот

При постоянном токе и установившейся температуре уравнение теплового баланса можно записать в виде:

$$E \cdot I = h \cdot p \cdot (T - T_0), \quad (4.5)$$

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 формулы (4.5) и гистерезиса ВАХ произведена оценка h (Таблица 4.6), определяющая требования к изоляции кабеля (особенно межслойной) с точки зрения стабильности. Коэффициент конвективного теплоотвода в жидкий азот для горизонтальной чистой поверхности [73] в несколько раз выше, чем полученные оценки коэффициентов теплоотвода с поверхности неизолированных кабелей, т.к.

большая часть поверхности кабеля находится в невыгодном положении для конвективного теплообмена, и поверхность, возможно, загрязнена.

Таблица 4.6 – Нагрев ВТСП слоя в образцах, оценка по гистерезису ВАХ

Образец	Мощность тепловыделения, Вт/м	Ток, А	Разогрев ВТСП слоя, К	h (4.5), Вт/мК
1 слой голый	1,5	430	~0,15	~10
1 слой изол.	1,25	420	~0,5	~2,5 !
16 лент голый	5	1640	~0,25	~15

4.10 Экспериментальные исследования стабильности ТНЭ

Исследование проводилось с целью определения устойчивости ТНЭ к импульсному току с амплитудой значительно выше критического, а также для проверки методики моделирования тепловых процессов в ТНЭ при тепловом возмущении в рабочем режиме. Разогрев образца «изнутри» текущим через него током для моделирования теплового возмущения представляется более предпочтительным, чем применение внешнего нагревателя, так как более точно имитирует локализацию тепловыделения в ТНЭ в обмотке магнита в результате наиболее распространенных мощных возмущений. Исследованы образцы N1 и N2.

Проводилось два типа экспериментов:

- в первом, на фоне тока, вызывавшего напряженность электрического поля порядка 1 мкВ/см, к этому току добавлялись импульсы тока амплитудой до 70% от критического тока и длительностью 0,5-1 секунда (Рисунок 4.14 а)
- во втором, использовалось устройство, аналогичное описанному в главе 2 для исследования ВТСП лент и ТНЭ для СОТ – постоянный магнит создавал локальное импульсное поле, уменьшавшее критток в образце. При этом в образце уже протекал критток в поле собственного тока. Измерялись потенциалы на различных участках ТНЭ, в том числе на том, где создавалось поле, и на примыкающих к нему.

Кроме того, поскольку в жидком азоте импульсы поля при криттоке не могли вызвать достаточный эффект, пришлось прибегнуть к третьему способу для создания локального теплового возмущения. Дополнительный импульсный ток вводился при локальном поле 80 мТл и рабочем токе, близком к критическому току при таком поле (Рисунок 4.14 б).

В первом эксперименте моделировалось распределенное тепловое возмущение и изучался разогрев ТНЭ, во втором – локальное возмущение, и изучалось еще и распространение резистивной зоны.

При обсчете экспериментов энергетическое возмущение вычислялось по ВАХ (экспериментальной и расчетной), поскольку нагрев производился «изнутри» за счет резистивного состояния при сверхтоке. Магнитное поле, если импульс тока вводился на «провале» токонесущей способности, созданном полем, учитывалось в зависимости ВАХ от магнитного поля.

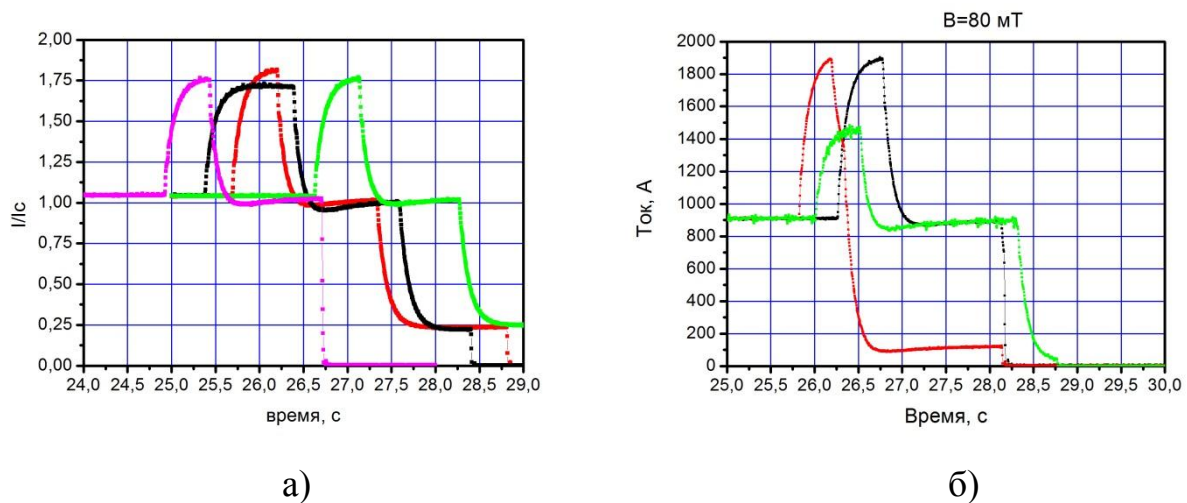


Рисунок 4.14 – Амплитуда и протяженность импульсов тока в эксперименте 1-го типа (а); амплитуда и протяженность импульсов тока в эксперименте 3-го типа (б)

Образцы ТНЭ со стальным изолированным формером, погруженные в жидкий азот, выдерживали почти двойной критический ток около 0,5 секунды без сгорания. Один из образцов деградировал после ~ 1 секунды импульса тока в ~ 1,7 раз больше критического, при этом температура ВТСП лент по различным оценкам составляла от 900 до 1200 К.

4.11 Расчетные исследования стабильности ТНЭ

Были произведены 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:

$$I(t) \cdot E(I, B, T, x) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \Delta W(t, x) = C \frac{\partial T}{\partial t} + p \cdot \alpha (T - T_{out}), \quad (4.6)$$

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.

Значения теплопроводности и электропроводности материалов взяты из [74], произведен расчет теплоемкости, теплопроводности и электропроводности в резистивном состоянии для сечения ТНЭ.

Были произведены эксперименты по тепловому переводу ТНЭ импульсами сверхтока до $1,7 I_c$ длительностью до 1 секунды и их обсчет по вышеприведенной модели. Температура выше 90 К восстанавливалась по измеренному

сопротивлению ТНЭ. При обсьете использовались экспериментальные значения напряженности электрического поля, а также ВАХ вида:

$$E_{\text{ТНЭ}}(I, B, T) = E_0 (-I / I_C(B, T))^{n(B, T)}, \text{ при } I \leq I_{sh1/2}(B, T), \quad (4.7)$$

$$E_{\text{ТНЭ}}(I, B, T) = I \cdot \rho_{\text{ТНЭ}}(T) \cdot f(I, B, T), \text{ при } I > I_{sh1/2}(B, T), \quad (4.8)$$

Где $I_{sh1/2}$ находится из уравнения:

$$E_0 (-I / I_C(B, T))^{n(B, T)} = 0,5 \cdot I_{sh1/2}(B, T) \cdot \rho_{\text{ТНЭ}}(T), \quad (4.9)$$

$f(I, B, T)$ имеет вид:

$$f(I, B, T) = 0,5 \cdot (1 + \text{Tanh} \cdot (I - I_{sh1/2}(B, T)) / I_0(B, T)), \quad (4.10)$$

Получено удовлетворительное совпадение экспериментальных данных, расчетов на основе эксперимента и расчетов на основе модельной ВАХ при однородном возмущении на ТНЭ с однородным критическим током. Сделан вывод о допустимости применения данной методики для более точной оценки минимальных критических возмущений и для моделирования тепловых процессов в ТНЭ. На рисунке 4.15 а приведен график одного из экспериментов 1-го типа (импульс, после которого образец деградировал). Также приведены результаты расчетов температуры в ВТСП лентах. В первом расчете температура выше 90 К восстанавливалась по измеренному сопротивлению ТНЭ и известной зависимости сопротивления от температуры. Во втором расчете производилось численное решение уравнения теплового баланса с подставленной в него измеренной мощностью тепловыделения. Также температура рассчитывалась из решения уравнения теплового баланса с подставленной в него ВАХ образца. Все три способа дали похожие зависимости температуры от времени. Причины расхождений – неоднородности ВАХ по длине лент и ТНЭ, трудность точного учета вклада изолированного «рыхлого» стального формера (им просто пришлось пренебречь).

На рисунке 4.15 б приведено расчетное распределение температуры сечения ТНЭ от координаты вдоль ТНЭ в разное время, полученное при моделировании одного из экспериментов 3-го типа, с локальным тепловым возмущением.

Произведена оценка скорости распространения резистивного состояния – 0,1-0,2 м/с.

По результатам экспериментов и расчетов сделан вывод о применимости методики моделирования тепловых процессов в ТНЭ (модели и приближений).

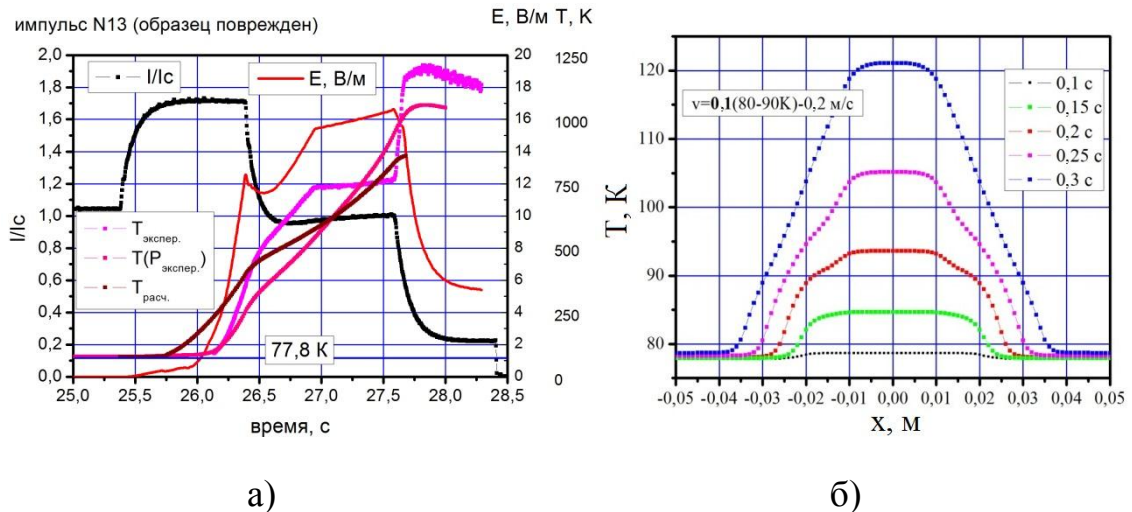


Рисунок 4.15 – Обсчет эксперимента с импульсным током (а); скорости распространения резистивной фазы и «горячего пятна» при локальном возмущении (б)

4.12 Расчет собственного поля и анализ его влияния для многослойных ТНЭ

Произведен ряд расчетов распределения собственного поля методом конечных элементов в пакете Comsol Multiphysics в моделях токнесущего элемента: геликоидальных с разным числом слоев, количеством и шириной лент, с поверхностными и объемными токами (Рисунок 4.16), а также плоских с разным числом и расположением лент. По величине поля и полевой зависимости критического тока лент можно оценить уменьшение критического тока ТНЭ по сравнению с суммой критических токов лент. Направление поля во всех моделях является тангенциальным. В 4-х слойной модели с поверхностными токами тангенциальное поле составило $\sim 15, 25, 35$ 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.

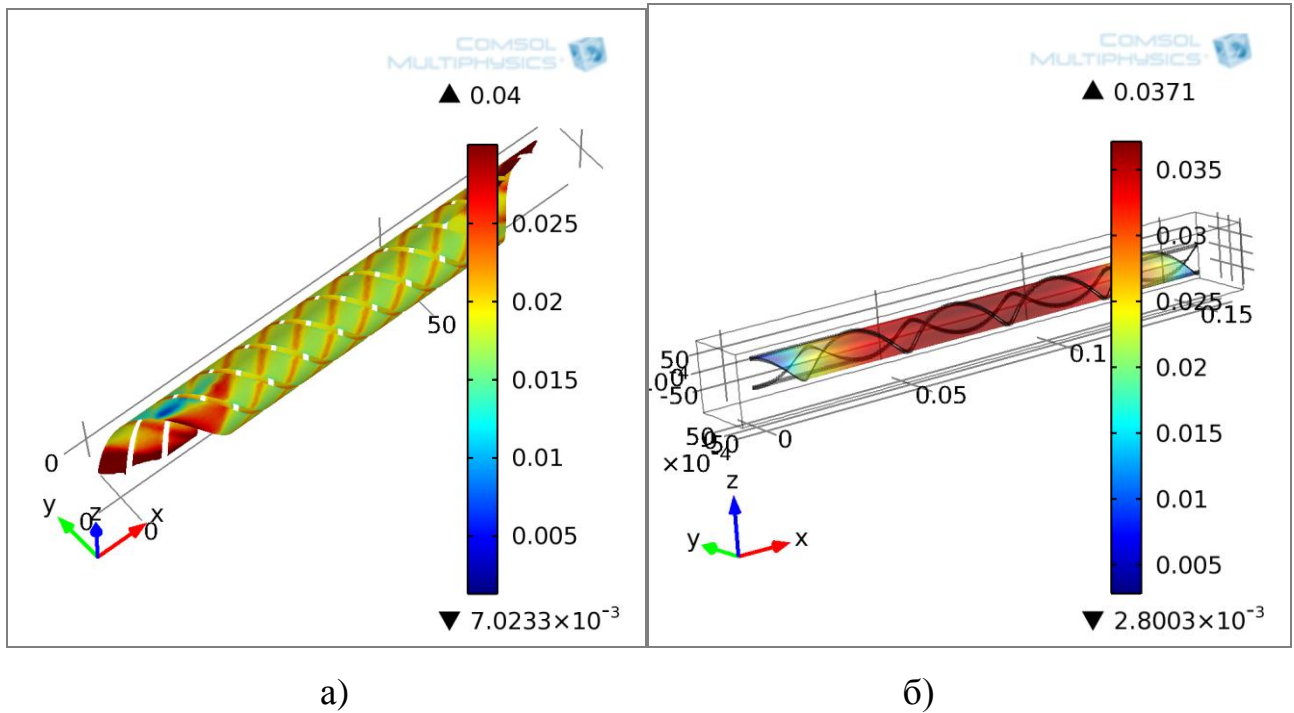


Рисунок 4.16 – Расчет распределения поля собственного тока: в 2-слойной модели с 4 ВТСП лентами (а); в 4-слойной модели с 1 лентой в слое, имитирующей 4 ленты по ширине (б)

Влияние собственного поля объясняет снижение криттока 4-слойного ТНЭ на 4-5% по сравнению с «суммой криттоков лент».

На рисунке 4.16 а приведен расчет в 2-слойной модели с 4 лентами в каждом слое, а на рисунке 4.16 б - в 4-слойной модели с 1 лентой (шириной в 4 реальные) в каждом слое.

4.13 Расчет деформации сжатия ВТСП слоя лент в образцах и кабелях и оценка влияния деформации на ток

Для расчета деформации ВТСП слоя при намотке лент на формер применен подход, описанный в работах [14] и [8], деформация сжатия ВТСП слоя:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{YBCO}}(r, p) &= (l_{\text{YBCO}} - l_{\text{neutral}}) / l_{\text{neutral}} = \\ &= (((1/4 p^2 + (r + c)^2 4\pi^2)^{1/2}) / ((1/4 p^2 + (r + c + 12 t)^2 4\pi^2)^{1/2}) - 1, \end{aligned} \quad (4.11)$$

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 $r_{\text{eff}} = -t/2\varepsilon$. Он сравнивается с минимально допустимым радиусом намотки (изгиба) ВТСП лент, указанным производителями. Результаты расчетов деформации, оценки влияния деформации на критический ток, и эффективные радиусы намотки приведены в таблице 4.7.

Зависимости I_c от деформации для гадолиноиевой и иттриевой керамики взяты из работы [14] (Рисунок 4.17 б).

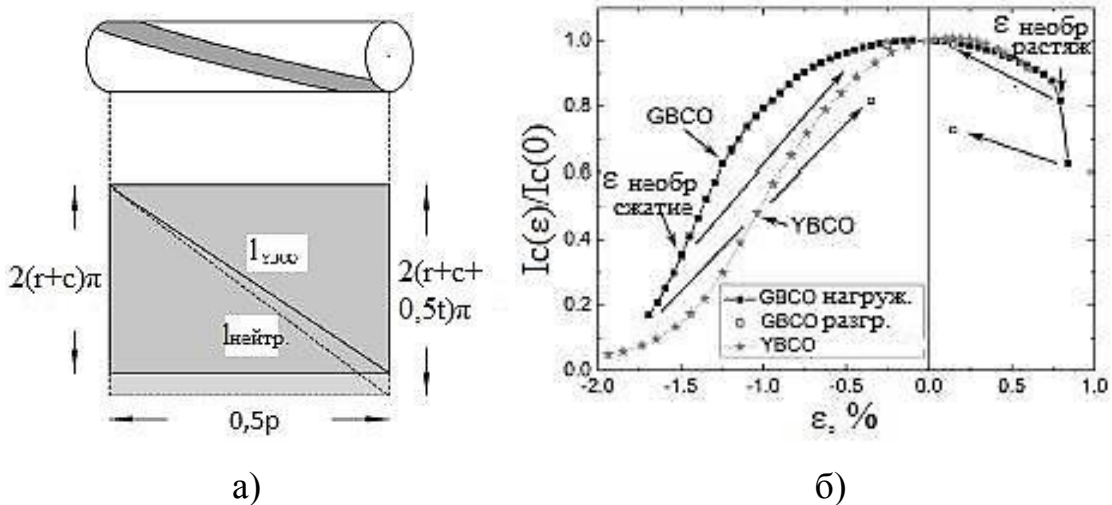


Рисунок 4.17 – Схема расчета деформации ВТСП слоя в ТНЭ (а); зависимости критического тока иттриевой и гадолиниевой ВТСП лент от деформации сжатия и растяжения [13] [14] (б)

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 равной амплитуды.

Таблица 4.7 – Влияние деформации на ленты в токонесущем элементе и геликоидальных образцах

Лента	Образец	ε (%)	$I_c/I_c(\varepsilon=0)$	r_{eff} (mm)	r_{min} (mm)
А	Ø6 мм, шаг 18 мм	-0.435	0.97	5.7	5.5*
В	Ø6 мм, шаг 18 мм	~-0.85	~0.65	~5.8	15
С	Ø6 мм, шаг 18 мм	-0.52	0.96	5.7	<15
А	N1	-0.326	0.99	7.7	5.5*
А	N2	-0.188	1	13.3	5.5*
С	N3	-0.226	1	13.3	<15

* для намотки как со сжатием, так и с растяжением ВТСП слоя при изгибе

Выводы по главе 4:

1. Разработана конструкция и созданы образцы геликоидальных гибких сильноточных ТНЭ малого диаметра из ВТСП лент 2 поколения.
2. Применена технология автоматизированной намотки коротких образцов (до 1 м) гибкого транспонированного ТНЭ.
3. Проведены исследования и отбор ВТСП лент для применения в данном типе ТНЭ.
4. Проведены комплексные экспериментальные и расчетные исследования образцов ТНЭ.
5. Токонесущая способность лент в ТНЭ не ухудшается из-за деформации при изготовлении.
6. Полученные характеристики, а именно – токонесущая способность, радиус изгиба и механическая устойчивость, достаточны для применения ТНЭ в обмотках магнитных систем, электроэнергетических устройствах и гибких токопроводах.
7. Опробована методика численного моделирования тепловых процессов в ТНЭ.

5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ, ПРИМЕНЕНИЮ ГЕЛИКОИДАЛЬНОГО ТНЭ И ПО РАЗРАБОТКЕ УСТРОЙСТВ НА ИХ ОСНОВЕ

Целесообразно рассмотреть основные перспективные применения геликоидального ТНЭ:

1. Тороидальные магниты токамаков, в том числе термоядерных источников 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 токоподводы 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
- 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, 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 больших механических напряжениях и плотностях тока.

Преимущества в выборе хладагента и рабочей температуры делают 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 токоподводы (для соединения сверхпроводниковых устройств с тоководами и между собой) могут применяться в ускорителях частиц и других устройствах. Большой адронный коллайдер потребует ~1000 км сверхпроводниковых токоподводов.

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

Возможно применение геликоидального ТНЭ и в ряде других устройств:

- электродвигатели, в основном для флота – униполярные или МГД;
- электрогенераторы – ветрогенераторы;
- электрогенераторы (в том числе МГД) на космических кораблях и базах, имеющих ядерный реактор, по соображениям компактности и легкости устройства;
- токоограничители индуктивного типа;
- высокополевые вставки в магнитах ускорителей частиц.

5.1 Разработка экспериментального устройства для производства гибкого геликоидального ТНЭ и обмоток магнитных систем из него

Производство геликоидального сильноточного ТНЭ требует разработки специальных намоточных устройств, работающих на принципе квазижесткого позиционирования ВТСП лент. Уже 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 длинномерных кусков ТНЭ и обмоток из них было изготовлено экспериментальное автоматизированное устройство. Эскиз и внешний вид устройства показаны на рисунке 5.1.

Формер перематывается между бобинами примерно 1 метр 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.

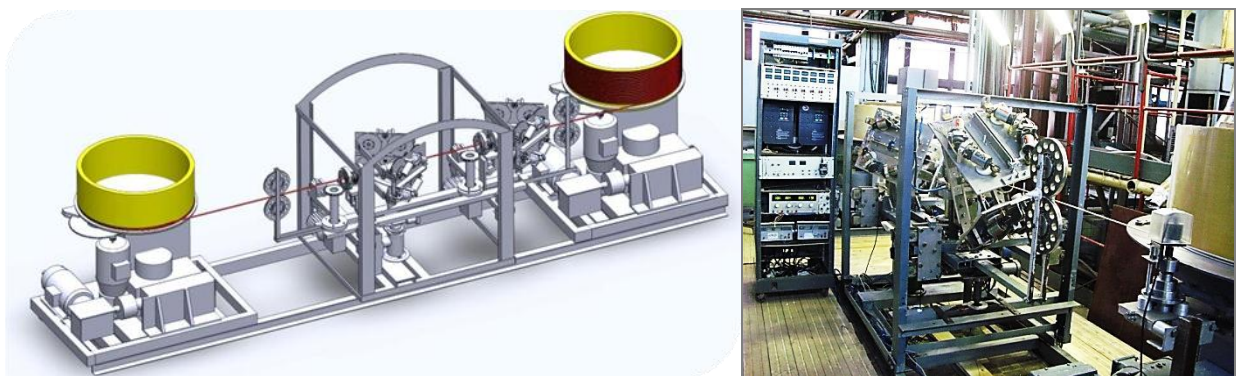


Рисунок 5.1 – Экспериментальное устройство для изготовления ТНЭ

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

5.2 Оценка параметров перспективных ТНЭ из различных ВТСП лент

Минимальный диаметр формера определяется необратимой деформацией ВТСП слоя, которая зависит от толщины подложки и стабилизатора ВТСП ленты, а также от значения деформации (сжатия, в некоторых случаях растяжения) необратимой деградации ВТСП слоя. Стоит выбирать диаметр формера на 30-40% больше минимального, чтобы не допускать необратимой деформации ВТСП слоя в каком-либо направлении.

Деформация, направленная тангенциально, либо сжатия (сверхпроводником вниз), либо растяжения (сверхпроводником вверх):

$$\varepsilon_{HTS} = (L_n - L_{HTS}) / L_n = t / (d + 2 \cdot c + t) \approx t / d, \quad (5.1)$$

где d – диаметр формера,

c – толщина меди,

t – толщина подложки.

Поскольку толщина подложки и стабилизирующей меди много меньше диаметра формера (закругления). По данной формуле и результатам исследования токонесущей способности при деформации можно оценить минимальный диаметр формера или закруглений формера, при котором возможна геликоидальная намотка.

Из рисунка 5.2 а видно, что лента компании Bruker, исследованная в [75], быстро деградирует при деформации сжатия, зато при деформации растяжения токонесущая способность повышается до 0,35-0,5% деградации и дальше до 0.6% снижается незначительно. Следовательно, ее стоит пробовать наматывать геликоидально ВТСП слоем вверх, а минимальный диаметр закругления может быть (исходя из деформации 0,6-0,7%) 14-16 мм для ленты со 100 мкм подложкой и 7-8 мм для ленты с 50 мкм подложкой по несколько пессимистической оценке (может быть и 6 мм, без гарантии).

Лента производства American Superconductor, исследованная в [68], несколько более устойчива к деформации сжатия, резкое снижение токонесущей

способности наступает после 0,6-0,65%. Поэтому для ленты с подложкой 100 мкм минимальный диаметр геликоидальной намотки оценивается в 15 мм (больше 12 мм).

Лента производства SuperPower с толщиной подложки 30 мкм, которую начали производить в 2014 году, при ее критической деформации сжатия больше 1% (Рисунок 5.3), может быть намотана на диаметр закругления, по крайней мере, около 3 мм, возможно и до 2,5 мм.

Максимальный угол и шаг намотки определяются допустимым (0-10%) уровнем деформации ВТСП слоя вдоль направления течения транспортного тока в лентах, т.е. диаметром формера, толщиной подложки и стабилизатора ленты, а также значением деформации ВТСП слоя, при котором происходит допустимая (0-10%) деградация токонесущей способности. Угол намотки выбирается из расчета количества лент в слое, при этом, как можно более острым ($\sim 30^\circ$), так как тогда получается меньшая продольная деформация, а также меньший расход ленты на единицу длины ТНЭ, чем при более тупых углах.

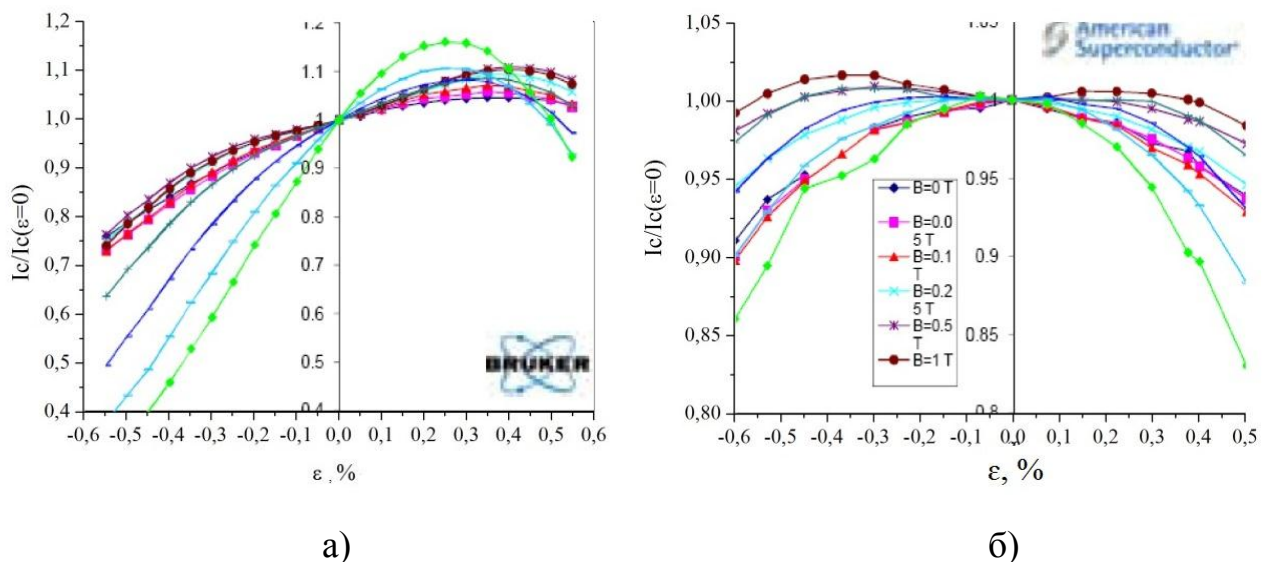


Рисунок 5.2 – Результаты исследования [75] зависимости токонесущей способности от деформации сжатия и растяжения ВТСП лент:

Bruker (а); American Superconductor (б)

При геликоидальной намотке ВТСП слоем вниз с шагом p

$$\varepsilon_{HTS} = (L_n - L_{HTS}) / L_n = (((\pi(d+2c+t))^2 + p^2)^{1/2} - ((\pi(d+2c))^2 + p^2)^{1/2}) / ((\pi(d+2c+t))^2 + p^2)^{1/2}$$

И при намотке ВТСП слоем вверх

$$\begin{aligned} \varepsilon_{HTS} &= (L_{HTS} - L_n) / L_n = \\ &= (((\pi(d+2c+2t))^2 + p^2)^{1/2} - ((\pi(d+2c+t))^2 + p^2)^{1/2}) / ((\pi(d+2c+t))^2 + p^2)^{1/2} \end{aligned}$$

Результаты расчета «продольной» деформации ВТСП слоя лент представлены в таблице 5.1. При намотке сверхпроводником вверх под углом 30° ленты Bruker со 100 мкм подложкой имеют деформацию 0,2% на формере 12 мм и 0,25% на 10 мм формере. Такие деформации растяжения не вызывают деградации токонесущей способности (даже, наоборот, небольшое увеличение). Если изготовить такую же ленту с подложкой 50 мкм, то диаметр формера можно снизить до 6 мм, что не противоречит оценке из соображений «поперечной» деформации.

Деформация ленты производства American Superconductor, имеющей 100 мкм подложку, составит 0,25% при намотке на 10 мм формер и 0,2% при намотке на 12 мм формер под углом 30° . Из соображений критической деформации допустима намотка на диаметр от 12 мм и такая намотка, по предварительной оценке, вызовет уменьшение критического тока на 2,5%.

Ленты компаний Bruker и American Superconductor изготавливаются на основе YBCO керамики, гораздо более устойчивой к воздействию медленных нейтронов, чем GdBCO. Ленты этих производителей могут найти себе применение в ТНЭ с проточным охлаждением для крупных, масштаба ITER, токамаках. В таких устройствах допустимы и даже желательны 12-15 мм формеры, а рабочая плотность тока в обмотках из ВТСП будет определяться, в основном, механическими свойствами ТНЭ и корпуса магнитов.

При геликоидальной намотке ленты SuperPower с 30 мкм подложкой сверхпроводником вверх деформация сжатия, при диаметре формера 3 мм и угле намотки 30° составит 0,85%. В GdBCO ВТСП (Рисунок 5.3) [14] такая деформация вызовет уменьшение критического тока примерно на 5%. Диаметр формера 3 мм, по видимому, является минимальным для ТНЭ из подобных лент. Таким образом,

для увеличения рабочей плотности тока в обмотке следует применять ленты с гадолиниевой керамикой и как можно более тонкой подложкой.

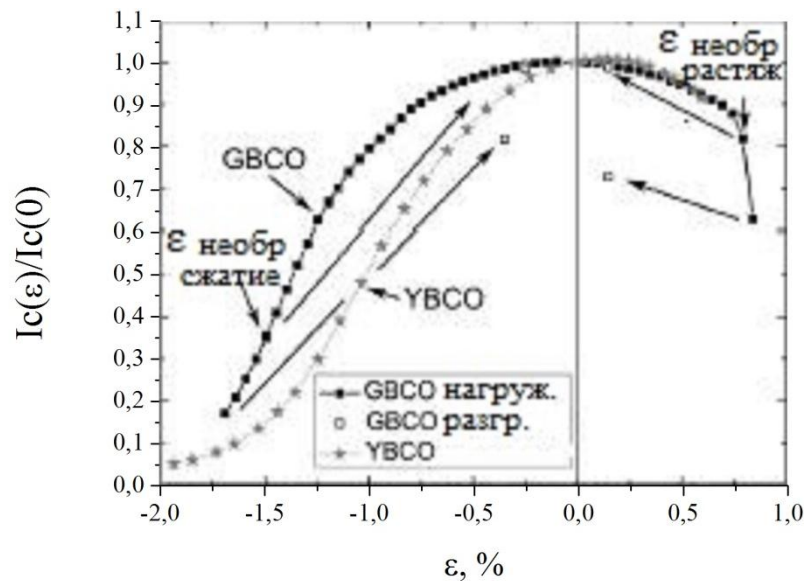


Рисунок 5.3 – Результаты исследований [14] зависимости критического тока лент производства SuperPower из ВТСП на основе иттрия и гадолиния

В заключение обязательно нужно отметить, что деформация ВТСП слоя ниже критической – не единственное требование к ВТСП лентам при намотке геликоидальных ТНЭ. ВТСП лента при геликоидальной намотке не должна также подвергаться так называемой деляминации, то есть расслаиванию по ВТСП слою, по буферному слою и т.д., поскольку такое расслаивание вызывает механическую или химическую деградацию ВТСП слоя. Кроме того, при геликоидальной намотке ВТСП лента должна остаться плоской, а не принимать седловидную форму, иначе получившийся токонесущий элемент будет рыхлым, и ленты могут ломаться под действием пондеромоторных сил в магнитном поле. Поэтому каждая подходящая по расчетам конструкция ленты должна быть подвергнута ряду тестов на механическую устойчивость, как отдельно, так и в коротком образце ТНЭ.

Таблица 5.1 – Деформация ВТСП при геликоидальной намотке лент различных производителей

d	p	L _{hts}	L _n	ε	L _{hts}	L _n	ε
мм	мм	мм	мм	%	мм	мм	%
	30°	100 мкм	100 мкм	Bruker	50 мкм	50 мкм	Bruker
4	21,6032	25,44229	25,27784	0,65059	25,21285	25,13226	0,32066
5	27,004	31,68731	31,52416	0,51755	31,45954	31,37928	0,25576
6	32,4048	37,93307	37,77079	0,42964	37,70642	37,62639	0,21271
7	37,8056	44,17925	44,0176	0,36724	43,95341	43,87353	0,18206
8	43,2064	50,4257	50,26453	0,32066	50,20046	50,12071	0,15912
9	48,6072	56,67233	56,51152	0,28456	56,44756	56,3679	0,14132
10	54,008	62,91908	62,75857	0,25576	62,69469	62,6151	0,1271
11	59,4088	69,16593	69,00566	0,23226	68,94184	68,86232	0,11548
12	64,8096	75,41284	75,25277	0,21271	75,18902	75,10954	0,10581
13	70,2104	81,6598	81,49991	0,19619	81,4362	81,35677	0,09763
14	75,6112	87,90681	87,74706	0,18206	87,6834	87,604	0,09063
15	81,012	94,15385	93,99423	0,16982	93,9306	93,85124	0,08456
16	86,4128	100,4009	100,2414	0,15912	100,1778	100,0985	0,07926
d	p	L _{hts}	L _n	ε	L _{hts}	L _n	ε
мм	мм	мм	мм	%	мм	мм	%
	30°	AMSC	AMSC	AMSC	SP 30 МКМ	SP 30 МКМ	SP 30 МКМ
2	10,8016	12,62264	12,78794	1,29257	12,55812	12,60643	1,29257
3	16,2024	18,86928	19,03213	0,85564	18,80522	18,85321	0,85564
4	21,6032	25,11623	25,27784	0,63932	25,0524	25,10023	0,63932
5	27,004	31,3633	31,52416	0,51027	31,29961	31,34735	0,51027
6	32,4048	37,61044	37,77079	0,42455	37,54684	37,59451	0,42455
7	37,8056	43,85761	44,0176	0,36348	43,79407	43,8417	0,36348
8	43,2064	50,1048	50,26453	0,31777	50,04132	50,08891	0,31777
9	48,6072	56,352	56,51152	0,28227	56,28856	56,33612	0,28227
10	54,008	62,59922	62,75857	0,25391	62,53581	62,58335	0,25391
11	59,4088	68,84645	69,00566	0,23072	68,78306	68,83058	0,23072
12	64,8096	75,09368	75,25277	0,21141	75,03031	75,07782	0,21141
13	70,2104	81,34091	81,49991	0,19509	81,27756	81,32506	0,19509
14	75,6112	87,58815	87,74706	0,1811	87,52482	87,5723	0,1811
15	81,012	93,83539	93,99423	0,16899	93,77207	93,81955	0,16899
16	86,4128	100,0826	100,2414	0,1584	100,0193	100,0668	0,1584

5.2.1 Рекомендации по изготовлению магнитов из ТНЭ и к конструкциям ВТСП лент

По конструкции ВТСП лент:

Применительно к геликоидальному ТНЭ.

Уменьшение деформации при намотке, уменьшения диаметра формера:

1. Использовать хастеллойные подложки толщиной 50-60 мкм и меньше, например, 30 мкм. Поверхность ленты должна быть ровной.
2. Наносить большую толщину меди со стороны сверхпроводника, так, чтобы сверхпроводящий слой был как можно ближе к центральной линии.

Улучшение полевых характеристик:

1. Центры пиннинга (допирование, облучение протонами). Уменьшение анизотропии полевой зависимости токонесущей способности.

Для термоядерного синтеза:

1. При использовании GdBCO ВТСП, имеющего лучшие полевые и механические свойства по сравнению с YBCO, хроматографически разделять гадолиний, очищая его от изотопов Gd-155 и Gd-157 (имеющих большое сечение поглощения тепловых нейтронов).

По конструкциям ВТСП лент для ТНЭ токоограничителей:

1. Нанесение высокорезистивного слоя (например, латунь) с высокой теплопроводностью и теплоемкостью для защиты от перегорания лент в местах локального понижения токонесущей способности.
2. Использование дивертора – высокорезистивного слоя под слоем серебра, для ускорения распространения нормальной зоны от горячего пятна.
3. Увеличение пространственной однородности, особенно на масштабе десятков мм, применение диагностики неоднородностей, например, массив датчиков Холла или систем распределенного измерения температуры.

По конструкциям магнитов из геликоидального ТНЭ:

1. В импульсных устройствах, на переменном токе и в установках, требующих особой надежности, использовать проточное охлаждение через формер газообразным или жидким хладагентом. В устройствах, требующих особой

надежности, использовать дополнительно контактное охлаждение, с выбором большего запаса по температуре.

2. Использовать секционирование, обмотки галетного типа, с параллельным соединением по охлаждению (у каждой галеты или секции свой насос).
3. Использовать комбинированную диагностику и систему защиты – электрическую – всегда. Систему распределенного измерения температуры – на стадии выбора рабочего режима или хотя бы на стадии испытания кусков ТНЭ и отдельных секций магнита (поиск потенциальных «горячих пятен», выбор запаса по температуре).

5.3 Конструкция геликоидального ТНЭ для ТИН

В России проектируется термоядерный источник нейтронов (ТИН), который должен продемонстрировать возможность использования термоядерных нейтронов в токамаках современных размеров (JET) для наработки топлива и дожигания отходов АЭС, воспроизводства трития, а также возможность выработки электроэнергии. Тороидальный магнит проектируемого ДЕМО-ТИН может быть сделан из ниобий-олова. Но при этом он будет работать на пределе токонесущей способности ТНЭ, почти без запаса по температуре. По этой причине для тороидального магнита ТИН предлагается геликоидальный ТНЭ из ВТСП 2-го поколения. Это позволит достигнуть требуемых параметров магнита с существенным запасом, а в перспективе – значительно (вдвое) повысить поле, что очень важно для коммерческих термоядерных и гибридных электростанций. Желательно, чтобы технология была освоена несколько ранее, чем в ней появится жизненная необходимость. Рассмотрим конструкцию геликоидального ТНЭ, подходящего для тороидального магнита ТИН и оценим его возможные рабочие параметры.

Механическое напряжение в обмотке оценивается 500 МПа (если корпус и витки не разделены изоляцией), но в точках локальных перенапряжений может достигать и 1000 МПа. В случае если кондуиты и корпус изолированы,

напряжение может быть в 1,5-2 раза больше, поэтому необходимо, чтобы бандажи витков (конduit) и корпус работали как единое целое – изоляция должна быть внутри кондукта. Кроме того, коэффициент заполнения обмотки сталью должен составлять не менее 50% в тороидальном направлении и 25% – в радиальном направлении.

Проведены оценки возможных параметров ТИН, в том числе его магнитной системы [28]. На рисунке 5.4 а показана конструкция ТИН в разрезе. Величина поля на оси плазмы планируется ~ 5 Тл. Мощность потока нейтронов термоядерной реакции составит около 40 МВт (несколько киловатт тепловой нагрузки на обмотке). Из-за необходимой большой толщины защиты от нейтронного излучения 0,5 м и наличия внутри обмотки индуктора с радиусом хотя бы 0,5 м внутренний радиус тора может быть 0,51-0,52 м. Наружный радиус внутренней части обмотки, где магнитное поле максимально и достигает 11,5-12,5 Тл, составляет всего 1-1,2 м. Таким образом, радиальная толщина обмотки составляет всего 0,65 м. Кроме того форма тороидальных обмоток получается клиновидной (рисунок 5.4 б), а это приводит к довольно сложным условиям по механической устойчивости и относительно небольшому, всего ~ 25 мм, размеру токонесящего элемента (ТНЭ). Плотность тока в обмотке составит от 18 до 28 МА/м², что в 1,5-2,3 раза выше, чем в проекте ИТЭР.

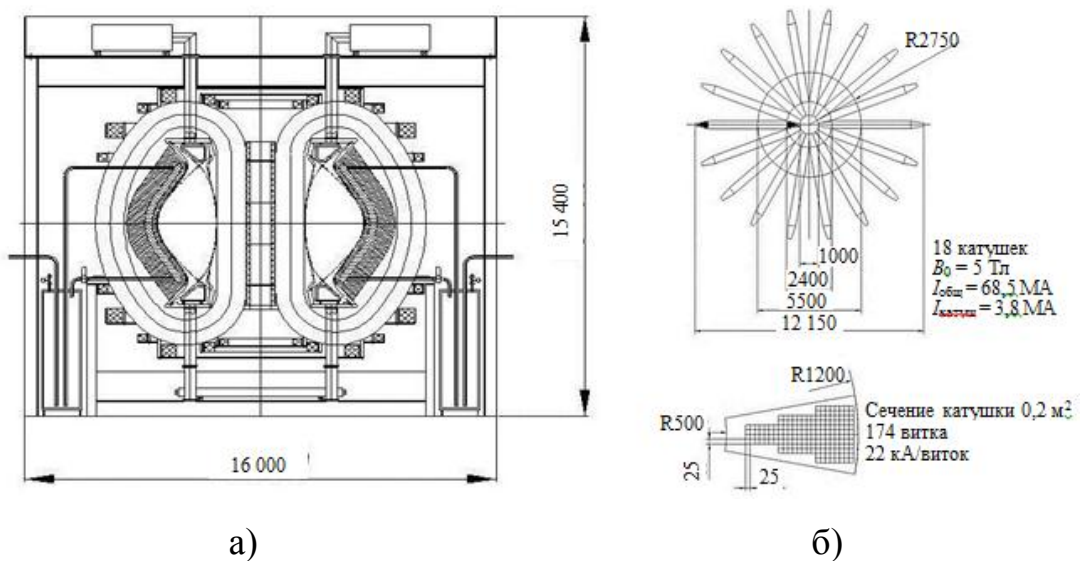


Рисунок 5.4 – Магнитная система ТИН (а) и расположение и сечение тороидальных обмоток (б)

Геометрия системы обуславливает довольно жёсткие требования к ТНЭ, связанные одновременно с высокой рабочей плотностью тока в поле 12 Тл и значительной радиационной тепловой нагрузкой. Эти требования связаны с необходимостью размещения в сечении обмотки достаточного количества сверхпроводника, стали, стабилизирующего материала и каналов охлаждения для обеспечения токонесущей способности, механической прочности и тепловой стабильности. Рассматривались различные варианты ТНЭ [28] на основе Nb_3Sn и ВТСП. Ниобий-оловянный ТНЭ удовлетворит требованиям по рабочему току при поле на обмотке ~ 12 Тл, однако, по зависимости токонесущей способности от поля, с учётом коэффициента заполнения, он будет работать в условиях, близких к предельным. Кроме того, Nb_3Sn потребует рабочей температуры ~ 5 К и будет иметь начальный запас по температуре всего $\sim 1-2$ К. Нагрев обмотки из-за радиационной тепловой нагрузки при работе в стационарном режиме, который может составить до $\sim 0,5-1$ К, уменьшит запас по температуре, что ухудшит термодинамическую стабильность. ВТСП ТНЭ может работать при температуре 10-20 К с запасом 5-10 К, на фоне которого радиационный нагрев будет несущественным, особенно учитывая более высокие теплоёмкости материалов при 10—20 К. Стабильность по отношению к локальным возмущениям энергии пропорциональна теплоёмкости, теплопроводности и запасу температуры, поэтому для ВТСП ТНЭ она на 2-3 порядка выше, чем для Nb_3Sn .

Полевая зависимость критической плотности тока ВТСП 2-го поколения позволит разместить в сечении обмотки сталь, стабилизирующую медь и каналы для охлаждения в заведомо достаточных объёмах, даже если (в перспективе) повысить поле и рабочий ток ТНЭ.

Применение транспонированного или частично транспонированного ТНЭ в токамаках оправдано для минимизации выделения энергии в ТНЭ при срыве тока плазмы и, следовательно, для устранения угрозы теплового перехода в нормальное состояние. В настоящее время в различных научных центрах и компаниях создаются образцы таких транспонированных и твистированных ТНЭ из ВТСП-лент 2-го поколения, как рёбель и ТНЭ на его основе, твистированные

стопки лент и геликоидальный токонесущий элемент, известный как CORCC (conductors on round core cable). На их основе предлагаются ТНЭ с рабочим током в десятки кА для токамаков. Кроме того, появились конструкции ТНЭ, в которых стопки ВТСП-лент наматываются в спиральные канавки на формере, а также конструкция, в которой стопки лент, вложенные в круглые кондуиты, наматываются на плоский формер наподобие резерфордовской скрутки. Эти две последние конструкции вряд ли можно будет применить для ТИН по требованиям габаритов и рабочей плотности тока. Конструкции и сравнительные исследования рёбеля, твистированных стопок и CORCC приведены в докладе [19], где показано, что из всех трёх типов ТНЭ CORCC проявил себя наилучшим образом во внешних магнитных полях до 12 Тл. Упомянутые высокие фрагментированность обмотки и коэффициенты заполнения сталью обуславливают размеры (<25 мм) и желательную овальную форму ТНЭ. Изоляция ВТСП от корпуса и плотная структура ТНЭ, не допускающая достаточного протока хладагента через массив ВТСП-лент, создают требование охлаждения ТНЭ изнутри. Это охлаждение может быть осуществлено путём прокачки хладагента (газообразный или жидкий гелий) через каналы внутри формера.

Одна из возможных конструкций ТНЭ с плоским закруглённым медным формером показана на рисунке 5.5 а. Раскладка намотки ТНЭ из серийной ВТСП-ленты SCS4050 AP производства SuperPower 2010 года [72] рассчитана для различных рабочих температур и запасов. Приведённая ВТСП-лента имеет ВТСП-слой ReBCO с допированием цирконием (улучшенный пиннинг), подложку из хастеллоя толщиной 50 мкм и покрытие 20 мкм из меди с каждой стороны ленты.

На рисунке 5.5 б представлены результаты предварительных расчётов рабочих режимов ТНЭ с различным числом ВТСП-лент. Сиреневой линией показана нагрузочная прямая магнитной системы – зависимость рабочего тока от создаваемого этим током максимального поля на обмотке. Серыми прямоугольниками обозначены рабочие токи 20 кА при 12 Тл, 25 кА при 15 Тл и 33 кА при 20 Тл. Для рабочего тока 20 кА и максимального поля на обмотке 12 Тл приведены два варианта ТНЭ из 286 лент с рабочей температурой 20 К и запасом

по температуре ~ 10 К, а также ТНЭ из 160 лент с рабочей температурой 10 К и запасом ~ 5 К. Поле на обмотке 15 Тл можно получить, например, при ТНЭ из 286 лент с током 25 кА, создав рабочую температуру 15 К и имея запас ~ 5 К. Раскладка до 286 лент приведена в таблице 5.2.

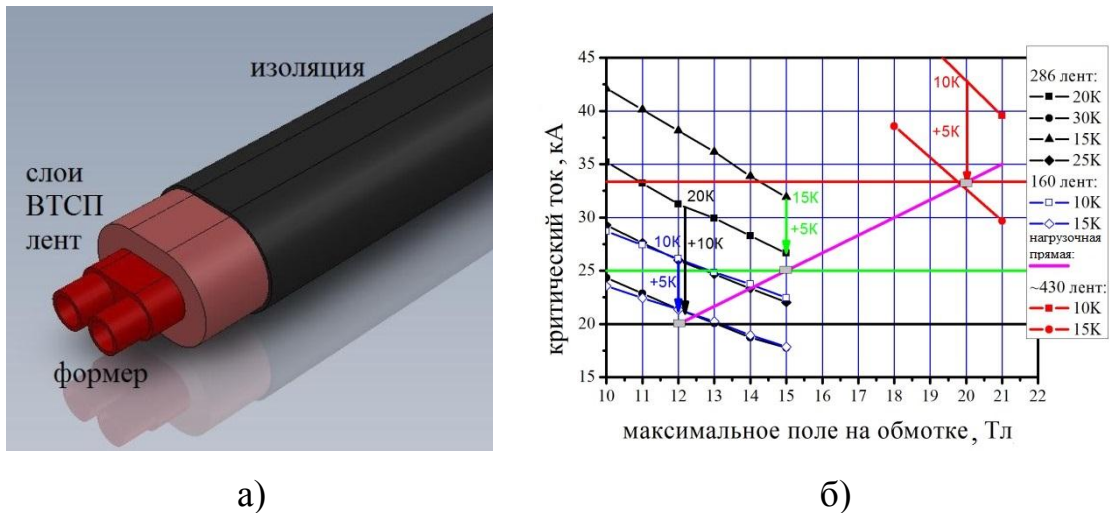


Рисунок 5.5 – Эскиз возможной конструкции ТНЭ (а) и рабочие токи, магнитное поле на обмотке, температура и запас для ТНЭ, изготовленных из 286 лент: 20 К (■), 30 К (●), 15 К (▲), 25 К (◆); из 160 лент: 10 К (□), 15 К (◇) и из ~ 430 лент: 10 К (■), 15 К (●), — — нагрузочная линия (б)

ТНЭ, показанный на рисунке 5.5 а, предлагается либо сначала вкладывать в конduit, а из него наматывать обмотки без изоляции от корпуса, либо вматы вать ТНЭ в пазы в корпусе непосредственно без кондуита. Максимальные ширина и толщина ТНЭ из 286 лент составят $\sim 20 \times 14$ мм, что позволит вместе с изоляцией уложиться в требуемые габариты $\sim 25 \times 25$ мм и обеспечить необходимый коэффициент заполнения обмотки сталью.

В перспективе будут актуальны поля порядка 20 Тл на обмотке. Даже из современной ВТСП-ленты такой ТНЭ уже можно изготовить. Для этого можно использовать ВТСП-ленту с подложкой 30 мкм. Такая ВТСП-лента уже производится, и она может быть намотана на меньший диаметр формера. Это позволит изготовить ТНЭ с заданными габаритами из 430 лент (или из несколько

меньшего количества лент с доступными на сегодня критическими токами, большими, чем у приведённых здесь лент). Рабочий ток ТНЭ будет 33 кА при рабочей температуре 10 К с запасом ~5 К.

В настоящее время существуют уже ВТСП-ленты с критическим током в поле 10-20 Тл и при температуре 10-20 К в 1,5 раза большим, чем критток ленты, приведённой в данной работе. Это достигнуто, например, в компании SuperPower за счёт создания большего количества эффективных центров пиннинга. Кроме того, есть методики напыления ВТСП-слоя, позволяющие получить более толстый (несколько мкм) слой ВТСП, без уменьшения плотности тока. Существуют также методики напыления нескольких слоёв ВТСП обычной толщины друг на друга с буферным слоем между ними. Все это позволяет рассчитывать на то, что, возможно, к тому времени, когда будет изготавливаться ТИН, прогресс в технологии ВТСП-лент позволит уменьшить необходимое количество лент в ТНЭ в 2-3 раза, т.е. количество ВТСП-лент для 20 кА ТНЭ с полем на обмотке 12 Тл при рабочей температуре 10 К и запасе 5 К составит от 60 до 100. Или же количества лент порядка 200-300 будет достаточно для ТНЭ устройств класса ДЕМО и FFHR на токи 60-100 кА.

Для 33 кА ТНЭ при 10 К в поле 20 Тл число ВТСП лент со свойствами, ожидаемыми после 20-го года, будет в диапазоне 150-200.

Возможны комбинированные тороидальные магниты с ВТСП-вставкой, повышающей поле НТСП-обмоток с ~10 до 12 Тл. Проточное охлаждение жидким гелием определяет рабочую температуру ~5 К с запасом 5-10 К. Число ВТСП-лент в ТНЭ составит 120-160 современных или от 40 до 80 лент после 2020 года.

Рассматривается концепция ТИН-СП с полем на оси плазмы ~10 Тл и максимальным полем на обмотке тороидального магнита 18-20 Тл, как в проекте ARIES. Такое высокое поле дает, в частности, выигрыш по плотности энергии термоядерной реакции в ~15 раз и, соответственно, на порядок больший поток быстрых нейтронов. Чтобы получить такое магнитное поле в ближайшей перспективе, желательно также создать комбинированную магнитную систему, в

которой ~ 10 Тл дает НТСП магнит, и 8-10 Тл добавляется ВТСП частью. Охлаждаемый жидким гелием 20 кА ТНЭ при температуре 5 К с запасом ~ 5 К в поле до 20 Тл может состоять из 150-200 современных ВТСП лент, и это количество может быть снижено до 50-100 к 2020 году. Характерные размеры такого ТНЭ в изоляции, овального либо круглого, составят $\sim 10-15$ мм, что даст возможность разместить в обмотке достаточное сечение конструкционной стали кондуита и корпуса.

Таким образом, 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; геликоидальный ВТСП-2 ТНЭ является перспективным для термоядерных и гибридных электростанций, в коммерческих электростанциях его использование будет необходимо; целесообразно применение геликоидального ВТСП ТНЭ уже в проектируемых сегодня термоядерных устройствах (УТС), в том числе в ДЕМО-ТИН.

Таблица 5.2 – Расчетные геометрические параметры 20 кА ТНЭ

№ слоя	Периметр, мм	Угол, °	Длина витка, мм	Шаг намотки, мм	Зазор, мм	Радиус изгиба, мм	Число лент в слое	ширина	толщина
1	33	29,6	66,84	58,1	0,05	141	7	6,56	12,91
2	33,7	31,5	64,41	54,9	0,05	145,5	7	6,77	13,12
3	34,3	32,2	64,44	54,5	0,1	76	7	6,98	13,33
4	35	33,8	62,78	52,1	0,1	79	7	7,19	13,54
5	35,6	33,4	64,71	54,0	0,2	42	7	7,4	13,75
6	36,3	34,9	63,34	51,9	0,2	43	7	7,61	13,96
7	36,9	27,4	80,17	71,1	0,05	168	8	7,82	14,17
8	37,6	29,3	76,80	66,9	0,05	172	8	8,03	14,38
9	38,2	31	74,23	63,6	0,05	177	8	8,24	14,59
10	38,9	32,66	72,24	60,8	0,05	181	8	8,45	14,8
11	39,6	33	72,64	60,9	0,1	95	8	8,66	15,01
12	40,2	34,4	71,16	58,6	0,1	97	8	8,87	15,22
13	40,9	33,8	73,53	61,1	0,2	52	8	9,08	15,43
14	41,5	35,1	72,2	59	0,2	53	8	9,29	15,64
15	42,2	29,1	86,7	75,8	0,05	204	9	9,5	15,85
16	42,9	30,6	84	72,3	0,05	208	9	9,71	16,06

Продолжение таблицы 5.2

17	43,5	30,9	84,6	72,5	0,1	109	9	9,92	16,27
18	44,2	32,3	82,5	69,7	0,1	111	9	10,13	16,48
19	44,9	31,59	85,8	73,1	0,2	59	9	10,34	16,69
20	45,5	32,8	83,9	70,4	0,2	60	9	10,55	16,9
21	46,2	27,4	100,2	88,9	0,05	231	10	10,76	17,11
22	46,8	28,9	96,7	84,6	0,05	235	10	10,97	17,32
23	47,5	29,1	97,53	85,1	0,1	122	10	11,18	17,53
24	48,1	30,5	94,8	81,6	0,1	125	10	11,39	17,74
25	48,8	29,5	99,1	86,2	0,2	66,7	10	11,6	17,95
26	49,5	30,8	96,5	82,9	0,2	67,9	10	11,81	18,16
27	50,1	25,9	114,6	103	0,05	258	11	12,02	18,37
28	50,8	27,4	110,2	97,8	0,05	262	11	12,23	18,58
29	51,5	27,5	111,3	98,7	0,1	136	11	12,44	18,79
30	52,1	28,9	107,9	94,4	0,1	139	11	12,65	19
31	52,8	27,7	113,6	100,6	0,2	73	11	12,86	19,21
32	53,4	29	110,2	96,4	0,2	75	11	13,07	19,42
						262 мм	286 лент		

Все технологии, необходимые для ВТСП обмоток УТС, уже существуют, нужно только объединить их и адаптировать под данную задачу.

5.4 Применения ТНЭ в магнитных системах перспективных межорбитальных плазменных двигателей мощностью 1-200 МВт

Одной из основных целей космонавтики на современном этапе ее развития является создание небаллистического транспортного средства передвижения между космическими объектами Солнечной Системы (буксира), обеспечивающего:

- большую скорость перемещения людей и грузов;
- безопасность;
- экономическую эффективность (низкую стоимость транспортировки);
- большой ресурс работы и высокую надежность;

- возможность использования в качестве рабочего тела широкого круга элементов и их соединений.

Одной из важных задач в этом сегменте космической техники является создание межорбитального двигателя, который работает в непрерывном режиме, и обладает возможностью регулирования отношения тяга/удельный импульс. Принятая программа РФ по созданию тяжелых ракет для вывода объектов в космос должна сопровождаться созданием «тяжелых» буксиров для транспорта людей и больших объемов грузов в космическом пространстве.

Для выполнения перечисленных выше требований необходимо создание принципиально новых двигателей буксиров, которые должны обеспечить:

- | | |
|--|---------------------------|
| - мощность тяги | 1-200 МВт |
| - диапазон изменения удельного импульса | 2000-7000 с |
| - ресурс огневой работы | 10^5 часов |
| - режим работы | стационарный |
| - плотность потока мощности на входе в сопло | 20-100 МВт/м ² |
| - энергетическая эффективность | > 70 % |
| - удельная масса | ~1 кг/кВт |

При указанных параметрах рабочее тело может находиться только в плазменной фазе и требуемые параметры плазменных потоков в мощных двигателях соответствуют параметрам горячей плазмы. Температура ионов аргона в ПРД при скорости истечения плазмы $5 \cdot 10^4$ м/с превышает 10^7 К. Любое взаимодействие таких потоков с материальными стенками одинаково смертельно как для потоков, так и для стенок. Известен единственный способ снятия этой проблемы – магнитная термоизоляция плазменных потоков от конструктивных элементов.

Только инновационный (основанный на новых физических принципах) безэлектродный стационарный плазменный ракетный двигатель (БПРД) с магнитной термоизоляцией может обеспечить требуемые технико-экономические параметры межорбитального буксира. Для создания и нагрева плазмы используются ВЧ или СВЧ антенны, расположенные вне плазмы. Отметим, что в

таким двигателем отсутствуют токи, нет объемного заряда и, следовательно, не требуются компенсаторы. Плотность вытекающего потока, который создает тягу буксира, ограничивается только устройствами нагрева и на много порядков превышает эту величину в холловских или ионных двигателях. Благодаря высокой плотности потока, БПРД может быть выполнен в виде компактного модуля небольших размеров с большой (любой) мощностью. Компоновка БПРД и выбор размерного ряда мощностей модулей определяется задачами (миссиями) буксиров и технологическими возможностями.

Использование мощных плазменных потоков обеспечивает увеличение скорости буксира в 10-100 раз больше максимально возможных для химических двигателей. Безопасность передвижения обеспечивается стационарностью работы двигателя, управлением вектором тяги, возможностью регулирования соотношения тяга-импульс при заданной мощности. Экономическая эффективность обеспечивается, в частности, высокой скоростью истечения рабочего тела и, тем самым, низким расходом рабочего тела. Это обеспечивает значительное увеличение отношения массы полезного груза к полной массе буксира. Большой ресурс работы и надежность обеспечиваются магнитной термоизоляцией вытекающих потоков от стенок двигателя и применением надежных отработанных средств создания и нагрева плазмы. В качестве рабочего тела возможно использование, в принципе, любых элементов.

Основными элементами такого двигателя являются:

- источник низкотемпературной плазмы, в котором происходит ионизация электронами рабочего вещества и создание плазменного потока холодной плазмы;
- ускоритель, в котором нагреваются ионы потока;
- магнитное сопло, в котором формируется создающий тягу направленный плазменный поток.

Магнитное поле связывает эти три элемента в единый компактный модуль, в котором обеспечены магнитная термоизоляция плазменных потоков от стенок и элементов конструкций, резонансные условия для генерации и нагрева плазмы и

создание тяги. Чрезвычайно важно отметить, что в этой магнитной конфигурации отсутствует удержание плазмы, ионы находятся в системе только пролетное время (~ 10 мкс), что практически исключает потери плазмы поперек магнитного поля.

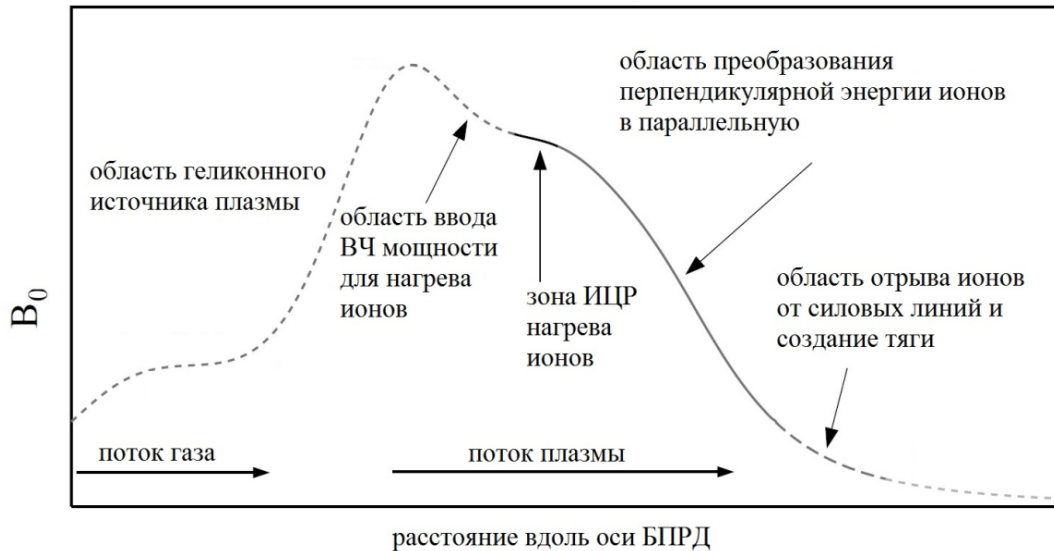
Существует ряд схем построения БПРД. Наиболее проработанной, экспериментально проверенной и технически реализуемой является схема с возбуждением геликонных волн в источнике плазмы, ускорением ионов в условиях ионного циклотронного резонанса (ИЦР) и формированием дающего тягу направленного плазменного потока в магнитном сопле. Все указанные процессы проходят в аксиально-симметричном магнитном поле специальной конфигурации, создаваемом простыми круглыми катушками (Рисунок 5.6).

Схема магнитной системы и ориентировочные размеры катушек, а также состав оборудования и некоторые рабочие параметры, приведены на рисунках 5.7 и 5.8 а.

Основные параметры системы:

- | | |
|---------------------------------------|--------------|
| - максимальное магнитное поле, Тл | 2 |
| - диапазон регулировки, Тл | 0-2 |
| - точность уставки величины поля, % | 1 |
| - время выхода на рабочие режимы, мин | 120 |
| - масса не более, кг | 100 |
| - режим работы, | стационарный |
- ВТСП-2 магнитная система галетного типа, в основном, для магнитной «пробки» (модульность, легкость охлаждения и диагностики, механическая прочность, удобство монтажа), или с послойной намоткой 1-2 слоя, для магнитов ГР и ИЦР;
 - токонесущий элемент – высокоточный геликоидальный с полым формером;
 - охлаждение – проточное газообразным гелием, температура ~ 30 К, запас ~ 5 К;
 - возможность работы с контактным охлаждением, с меньшим запасом по температуре;

- охлаждение – турбо-брэйтоновские криокулеры (низкая вибрация, высокая удельная мощность), 2 или больше, для резервирования;
- криостат в виде системы охлаждаемых экранов (3 или больше) с различными температурами;
- диагностика – одновременно электрическая на токовых контактах и с распределенными датчиками температуры с шагом порядка сантиметра.



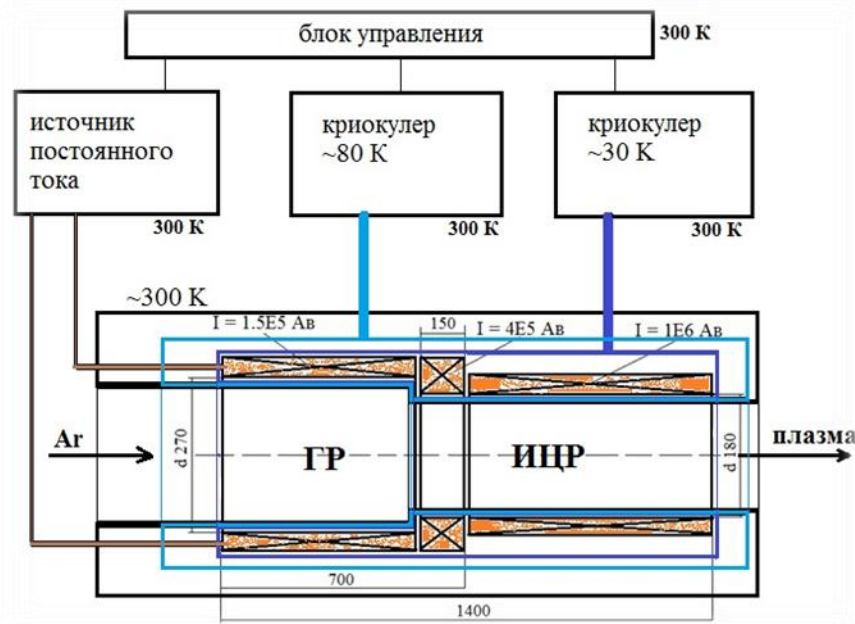
Стрелками показаны области плазменных процессов

Рисунок 5.6 – Распределение напряженности магнитного поля вдоль оси БПРД

Имея в виду межпланетный двигатель 10-20 МВт и в перспективе ТЯРД (для них нужны крупные магниты), стоит сразу делать системы из сильноточного ТНЭ, начиная уже со 100-200 кВт двигателя. Кроме того, ТНЭ имеет гораздо лучшую тепловую и механическую стабильность, чем единичная ВТСП лента. Для системы на 300 кВт лента как токонесущий элемент создает некоторое преимущество в цене системы и в массе источника тока, но для систем с большей мощностью сильноточный ТНЭ лучше по соображениям охлаждения, ввода и вывода тока, технологичности изготовления.

Рассмотрим 3 магнитные системы для двигателей с различной мощностью:

1. 300 кВт – отработка технологий, корректировка орбит космических станций – можно испытать и применить уже сейчас, можно испытывать на Земле в емкости с высоким вакуумом
2. 1 МВт – патрулирование околоземного пространства, экспедиции на Луну
3. 20 МВт – экспедиции к планетам земной группы, в первую очередь, к Марсу и к поясу астероидов.



ГР – область геликонного разряда, ИЦР – область ускорения ионов. Указан ток в магнитах в ампер-витках

Рисунок 5.7 – Схема магнитной системы БПРД мощностью 200-300 кВт

Для двух последних систем будет произведена довольно приблизительная оценка, поскольку их изготовление и применение связано, во-первых, с появлением ядерных источников энергии соответствующих мощностей в космическом исполнении и высоким к.п.д. Во-вторых, с отработанной на 300 кВт модели технологией плазменного двигателя, поскольку испытания двигателей с более высокой мощностью целесообразны только в космосе или на Луне.

Произведен расчет максимального поля на обмотках магнитов (Рисунок 5.8 б). Исходя из полевой зависимости критических токов ВТСП ленты SuperPower SCS4050 AP, выбраны рабочие токи для систем из единичной ленты (Рисунок 5.9

а) и из ТНЭ с различным числом лент (рисунок 5.9 б), причем системы из ТНЭ оптимизированы с учетом максимального поля в данном магните.

Магнитную систему БПРД мощностью до 300 кВт, по видимому, целесообразно делать из единичной ВТСП ленты, или из 2-4 лент, намотанных стопкой. Тем не менее, предлагается сразу также создавать технологию изготовления более крупных магнитных систем БПРД из сильноточных ТНЭ, поскольку изготовление таких крупных магнитных систем, какие нужны для 1-100 МВт двигателей, целесообразно только с применением сильноточного ТНЭ из 16-64 ВТСП лент.

Разрабатываемый в данной работе сильноточный ТНЭ:

1. Будет подходить к мощным двигателям и масштабироваться на требуемый объем.
2. Конструкция данного сильноточного токонесущего элемента естественным образом подразумевает принудительное проточное охлаждение газообразными или жидкими хладагентами (погружное охлаждение в космосе не работает из-за отсутствия конвекции, контактное – значительно менее эффективно).
3. Обеспечивает однородность токонесущей способности по длине за счет запараллеливания лент (единичная ВТСП лента неоднородна по токонесущим свойствам по длине), за счет этого повышается надежность.
4. Более устойчив механически, а также термодинамически более стабилизирован, чем единичная лента.
5. Повышается технологичность изготовления и надежность работы.

В целях отработки всех технологий, целесообразно все прототипы (начиная с 300 кВт) магнитных систем делать сразу из сильноточного ТНЭ с принудительным проточным охлаждением и рабочими температурами 20-30 К.

Произведем оценку размеров магнитных систем и количества ТНЭ в зависимости от мощности двигателя. Масштабирование можно произвести, исходя из диапазона удельных мощностей 40-100 МВт/м² площади сечения плазмы в области ИЦР. Вышеприведенный 300 кВт двигатель имеет плотность

мощности плазмы 40 МВт/м^2 , диаметр плазмы $0,1 \text{ м}$, диаметры магнитов $0,18$ и $0,27 \text{ м}$. Двигатель мощностью 1 МВт при 40 МВт/м^2 будет тогда иметь диаметр плазмы $0,18 \text{ м}$, магнитов – $0,26$ и $0,4 \text{ м}$. Можно ожидать в 20 МВт двигателе за счет масштаба и увеличения температуры плотность мощности плазмы 80 МВт/м^2 , тогда диаметр плазмы $0,56 \text{ м}$, магнитов – $0,7$ и 1 м . Длина масштабируется как корень кубический из отношения мощностей двигателей, деленный на отношение удельных мощностей на площадь сопла.

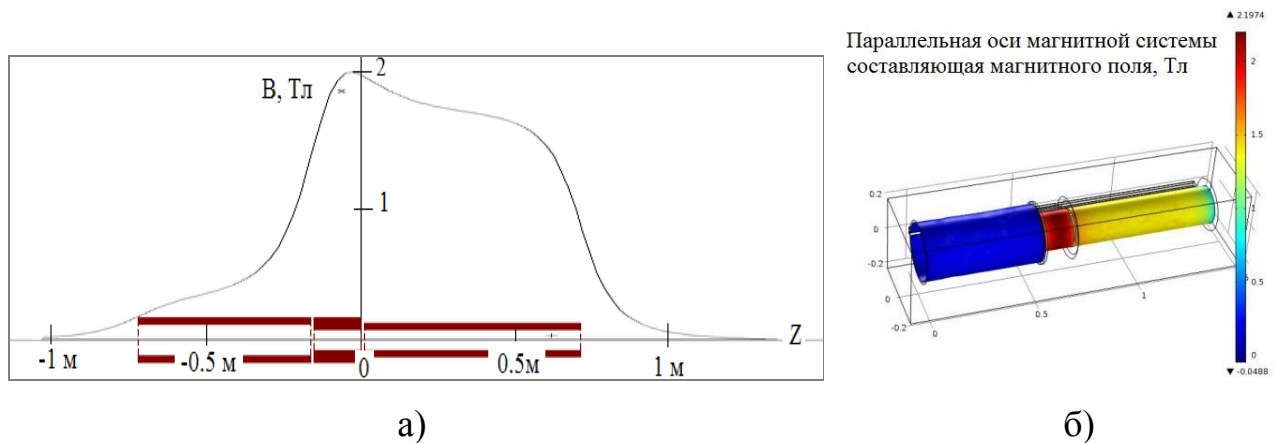


Рисунок 5.8 – Схема магнитной системы двигателя мощностью $\sim 300 \text{ кВт}$ (а); распределение продольного поля на обмотках магнитов этой системы (б)

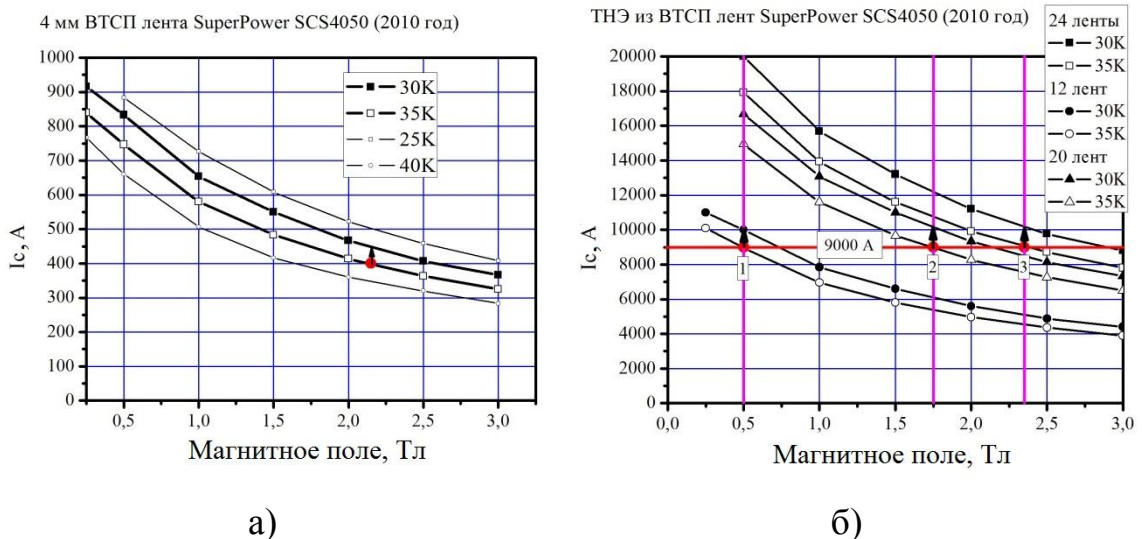


Рисунок 4.9 – Выбор рабочих точек в магнитах 300 кВт двигателя: из ленты (а); ТНЭ (б)

Оценка размеров магнитов, произведенная из этих соображений, а также количества ВТСП ленты и ТНЭ, необходимых для них, приведена в таблице 5.3. В таблице 5.4 приведены оценки массы оборудования для создания поля. Для систем из ВТСП-2, с учетом охлаждения, масса является вполне приемлемой на фоне массы других компонентов двигателя и с учетом возможностей по доставке на орбиту.

Таблица 5.3 – Геометрические параметры магнитов для двигателей различной мощности

	300 кВт лента, 400 А	300 кВт ТНЭ, 9 кА	1 МВт, 9 кА	20 МВт, 9 кА
Магнит ГР, размеры, мм./число ампер-витков	$\Phi 270 \times 550 / 1.5 \cdot 10^5$	$\Phi 270 \times 550 / 1.5 \cdot 10^5$	$\Phi 400 \times 800 / 2.25 \cdot 10^5$	$\Phi 1000 \times 1100 / 3 \cdot 10^5$
Магнит ГР, число витков/длина ленты, м /длина ТНЭ, м	375/320 м / -	17/200 м/14.5 м	25/460 м/32 м	34/1540 м/107 м
Магнит «пробка», размеры, мм./число ампер-витков	$\Phi 180 \times 150 / 4 \cdot 10^5$	$\Phi 180 \times 150 / 4 \cdot 10^5$	$\Phi 260 \times 225 / 6 \cdot 10^5$	$\Phi 700 \times 300 / 8 \cdot 10^5$
Магнит 2пробка», число витков/длина ленты, м /длина ТНЭ, м	1000/580 м / -	45/830 м/30 м	67/1700 м/60 м	90/6000 м/200 м
Магнит ИЦР, размеры, мм./число ампер-витков	$\Phi 180 \times 700 / 1 \cdot 10^6$	$\Phi 180 \times 700 / 1 \cdot 10^6$	$\Phi 260 \times 1000 / 1.5 \cdot 10^6$	$\Phi 700 \times 1400 / 2 \cdot 10^6$
Магнит ИЦР, число витков/длина ленты, м /длина ТНЭ, м	2500/1430 м / -	112/1540 м/67 м	170/3300 м/140 м	220/11500 м/480 м
Всего ВТСП ленты, м	2330 м	2570 м	5 500 м	19 000 м

Все магнитные системы оценивались, исходя из свойств современной ВТСП ленты, хотя 1 МВт, и особенно 20 МВт, скорее всего, будут построены через

несколько лет из ВТСП лент со значительно лучшими свойствами. Кроме того, для межпланетных пилотируемых экспедиций можно пойти по принципу модульной структуры, с числом модулей от 4 до 10, из соображений надежности (но это увеличит массу на 1 МВт мощности).

Таблица 5.4 – Оценка массы магнитных систем для плазменных двигателей

Оборудование или его компоненты	300 кВт	300 кВт ТНЭ	1 МВт	20 МВт
Токонесущий элемент	-	20 кг	40 кг	200 кг
В составе ТНЭ – ВТСП лента	10 кг	10 кг	20 кг	100 кг
Каркас, изоляция, бандаж	30 кг	20 кг	40 кг	200 кг
Источник постоянного тока 10 кА 1В	400 А; 10 кг	50 кг	50 кг	50 кг
Блок управления питанием, охлаждением	10 кг	10 кг	10 кг	10 кг
Тепловые экраны (300 К – 80 К – 30 К)	10 кг (~3 м ²)	10 кг (~3 м ²)	20 кг (~6 м ²)	100 кг (~30 м ²)
Криокулеры 30 К на магнит и 80 К экран	30 кг	30 кг	50 кг	250 кг
Суммарная масса	~100 кг	~150 кг	~200 кг	~800 кг

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 сильнооточного геликоидального ТНЭ.

В перспективе на основе конструкции мощных безэлектродных плазменных двигателей мощностью 1-200 МВт может быть создан термоядерный реактивный двигатель (ТЯРД), где увеличение температуры рабочего тела будет происходить за счет термоядерной реакции.

Возможно создание плазменных двигателей большой мощности, особенно, в перспективе, ТЯРД, с высокими полями (вплоть до 15-20 Тл). Это может существенно повысить плотность энергии плазмы, снизить размеры и вес двигателей.

Система экранировки от заряженных частиц магнитным полем может представлять собой тор из ВТСП галет, с диаметром отверстия в несколько метров, по размеру кабины, и диаметром галет примерно таким же. Поле должно составлять не менее 5 Тл для отсечки галактических протонов с энергией до 300 МэВ. Это – самое, пожалуй, масштабное сверхпроводниковое устройство, которое можно придумать для космического корабля (кроме токамака, в отдаленной перспективе), но оно совершенно необходимо для экспедиций к планетам-гигантам, патрулирования пояса астероидов и других длительных миссий.

Температуру целесообразно поддерживать на уровне 20-30 К с запасом 5-10 К. Охлаждение проточное и контактное как резерв (при условии снижения поля для увеличения запаса по температуре).

Конструкция турбинного генератора электроэнергии сильно привязана к особенностям перспективных кораблей, которые пока не определены. Однако для 20 МВт генератора применение ВТСП может в разы снизить массу и габариты.

Основная проблема ядерной энергетической установки космического корабля состоит не в отсутствии реактора (разработаны реакторы на быстрых нейтронах для производства электроэнергии, а также для создания тяги путем нагрева рабочего тела). Не существует преобразователей тепловой энергии ядерного реактора, удовлетворяющих всем требованиям космического корабля – термоэмиссионные преобразователи имеют низкий к.п.д., а турбогенераторы – недостаточный ресурс. МГД генератор, работающий на газообразном щелочном металле, нагреваемом реактором на быстрых нейтронах до 2-3 тысяч К, мог бы решить данную проблему. Целесообразна разработка такой энергоустановки на основе реактора для создания тяги (аналогичного реактору, разработанному в КБХА) и МГД генератора с магнитной системой из ВТСП ТНЭ.

Силовые кабели из ВТСП ТНЭ, кроме снижения массы корабля, помогут снизить тепловыделение в труднодоступных частях. Охлаждение может быть проточное, в том числе, для простоты поддержания температуры, жидким азотом. В основном, могут служить для питания генераторов ГР и ИЦР, а также для питания постоянным током магнитных систем двигателя и экранировки.

5.5 Гибкие токоподводы с проточным охлаждением

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, Дубна), в который входят нуклотрон, бустер и коллайдер. Магниты каждого из ускорительных колец могут быть запитаны через сверхпроводниковые токоподводы, температура которых может быть и выше жидкого гелия. Охлаждаться токоподводы могут газообразным гелием, испаряющимся в системе охлаждения магнитов, или жидким гелием. Рабочие токи магнитов нуклотрона 6 кА (до 9 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 длиномерного 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. Таким образом, данный токоподвод с проточным охлаждением может быть использован для питания любых вышеперечисленных магнитов NICA.

Рабочие токи магнитов установки «NICA» планируются в диапазоне от 6 до 18 кА. Исходя из потребностей проекта «NICA» и нашей конструкции токоподводов, можно оценить рабочие параметры изготавливаемых в Курчатовском институте токоподводов. Будем учитывать влияние собственного поля токоподводов, а влиянием внешнего, рассеянного поля магнитов, пренебрегаем. Были численно рассчитаны тангенциальные поля в каждом слое ВТСП лент прототипов гибких токоподводов в зависимости от рабочего тока, в приближении равномерного распределения тока по слоям и по лентам в каждом слое. Сравнение с экспериментальными данными по токонесущей способности ТНЭ в

поле собственного тока показало, что такое приближение практически применимо.

На рисунке 5.10 сиреневыми линиями показаны «нагрузочные прямые» каждого из четырех слоев ВТСП лент гибкого токоподвода, зависимости тока слоя от создаваемого этим током тангенциального поля. Синими линиями на графике 5.10 показана зависимость критического тока ВТСП лент производства SuperPower со свойствами, похожими на используемую нами ленту, от магнитного поля, параллельного поверхности ленты при температуре 20К [10]. Красным и черным цветом показаны примерные экстраполяции этой зависимости на температуры 10 К и 5 К соответственно. Горизонтальные прямые линии отображают гарантированный в каждом слое, независимо от тангенциального поля, рабочий ток – черная прямая – 18 кА при 5К (проточное охлаждение жидким гелием), красная прямая – 12 кА при 10К, и синие прямые – токи 6 и 9 кА при 20К (проточное охлаждение газообразным гелием). Таким образом, видно, что конструкция токоподводов и криогенная система «NICA» смогут обеспечить работу токоподводов на токах магнитов при доступных рабочих температурах с запасом по току, обеспечивающим стабильность. Стрелками обозначены запасы по рабочему току, составляющие от 1.5 до 4 кА на токоподвод при токах от 9 до 18 кА.

Из приведенного оценочного расчета следует, что при использовании современной серийной ВТСП ленты возможно изготовить на нашем устройстве токоподвод с рабочим током 10-20 кА при температурах 5-20 К для магнитов ускорителей частиц, в частности, для проекта «NICA». Изготовленные в 2014 году длинномерные гибкие токоподводы удовлетворяют требованиям к токоподводам для магнитных систем ускорителей частиц по токонесущей способности.

Расчет раскладки для намотки токоподвода был осуществлен по схеме и формулам, приведенным в главе 4, в описании расчета раскладки макетов ТНЭ из стальной ленты. Результаты расчета раскладки для изготовления гибкого токоподвода приведены в таблице 5.5.

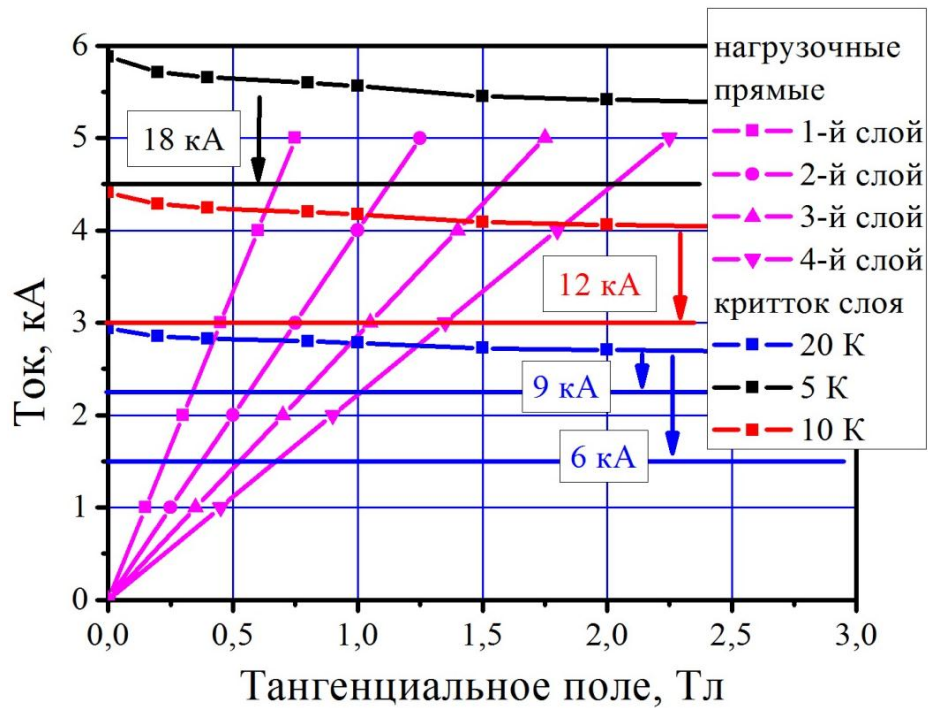


Рисунок 5.10 – Результаты расчетной оценки рабочих режимов токоподводов к магнитам бустера, коллайдера и нуклотрона NICA, с учетом поля собственного тока

Таблица 5.5 – Расчет раскладки намотки и геометрических параметров 10 м токоподвода

слой	периметр мм	угол град.	длина мм	шаг намотки мм	зазор мм	радиус сгиба мм	средний диаметр мм	внешний диаметр мм	коэфф-т использования лент
1	20,1	26,5	45	40	0,45	18,1	6,4	6,55	1,11744
2	20,7	27,5	45	39,9	0,55	15,9	6,6	6,75	1,12731
3	21,4	32,6	39,6	33,4	0,45	19,3	6,8	6,95	1,18728
4	22	33,2	40,1	33,6	0,55	16,9	7	7,15	1,19563

Токоподводы изготавливались по отработанной на резистивных лентах схеме – в 4 слоя, по 4 ВТСП ленты каждый, за один проход. Два первых слоя наматывались в одном направлении, два других – в противоположном первым слоям направлении. Углы и шаги намотки выставлялись в соответствии с таблицей 5.5.

Изготовленный длинномерный токоподвод, намотанный на приемную бобину экспериментального устройства, изображен на рисунке 5.11.

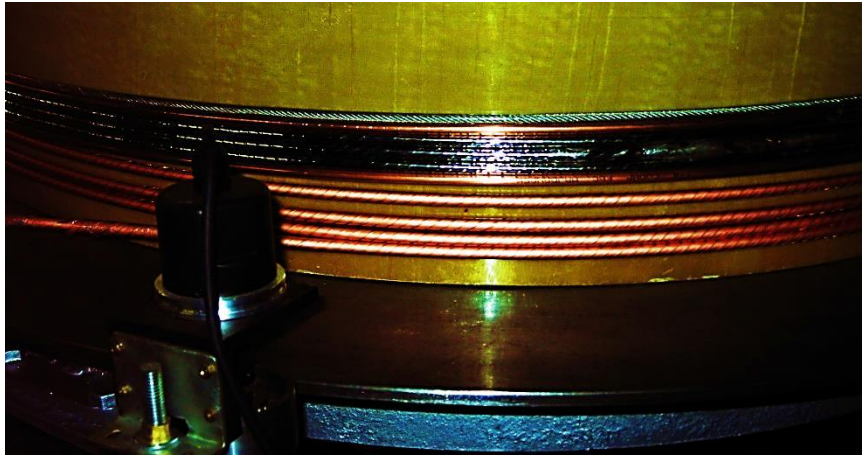


Рисунок 5.11 – Длинномерный прототип токоподвода на приемной бобине устройства

5.6 Рекомендации по применению ТНЭ для СПИН

Для питания ряда импульсных нагрузок (боевой лазер, загоризонтная РЛС, рельсотрон, торпедный аппарат, разгонная катапульта) на малогабаритных аппаратах с требованиями по минимизации веса и габаритных размеров (космос, авиация, флот) будут необходимы накопители энергии мегаваттного класса со временем разряда $\sim 0,1-1$ секунды. В качестве таковых возможно применение ВТСП СПИН с рабочими температурами 20-30 К и проточным охлаждением газообразным гелием, охлаждаемым при помощи криокулера. Из соображений оптимизации напряжения вывода энергии накопители такой мощности целесообразно изготавливать из ТНЭ с токами до единиц кА. Скорость изменения тока и поля на обмотке подразумевает использование частично транспонированного ТНЭ для минимизации диссипации энергии в обмотке и повышения термодинамической стабильности сверхпроводниковой магнитной системы. Конструкция геликоидального ТНЭ с полым медным формером автоматически удовлетворяет всем вышеприведенным требованиям и поэтому может быть применена в импульсном СПИН.

В качестве прототипа накопителя рассмотрим магнит в виде катушки Брукса. Катушка Брукса – это конфигурация соленоида, обладающая наибольшим соотношением индуктивности к длине ТНЭ в обмотке. Индуктивность рассматриваемой катушки 0,4 Гн, внутренний диаметр 350 мм, внешний диаметр 700 мм, высота обмотки 175 мм. ТНЭ состоит из 16 лент (SuperPower с током ~100 А в жидком азоте при температуре 77 К), намотанных на круглый полый медный формер. Количество витков $N=306$ в 9 двойных галетах по 34 витка (примерно по квадратному сантиметру на виток с учетом корпуса).

Максимальное поле оценивалось по формуле: $B=\mu_0/2*N/r*I$. Коэффициент соленоида составляет 1Тл/900А.

Полагалось такое же максимальное поле на обмотке. Энергия накопителя вычислялась по формуле: $W=L\cdot I^2/2$, значения максимального тока вычислялись из пересечений полевой зависимости токонесущей способности ленты, умноженной на 16, с нагрузочной прямой катушки (Рисунок 5.12).

В таблице 5.6 представлены значения максимальной запасенной энергии рассматриваемого магнита, и его максимальные токи при различных температурах. Доля запасенной энергии накопителя, которая может быть использована в практических целях, может составлять примерно 40-70% от максимальной энергии.

Транспортные потери на переменном токе в ВТСП ТНЭ приблизительно подчиняются закону масштабирования, аналогично, например, потерям в ВТСП рёбель-кабелях [76]:

$$Q\left(\frac{I_{peak}}{I_c(T, B)}, T, B\right) = Q\left(\frac{I_{peak}}{I_c(77\text{ К}, 0\text{Тл})}, 77\text{ К}, 0\text{Тл}\right) * \left[\frac{I_c(T, B)}{I_c(77\text{ К}, 0\text{Тл})}\right]^2, \quad (5.2)$$

где Q – мощность транспортных потерь, Вт/м кабеля,

I_{peak} – амплитуда переменного тока, А

I_c – критический ток, А

T – температура, К

B – амплитуда индукции магнитного поля, Тл.

Используя (5.2) и данные измерений, представленные на рисунке 5.12, можно оценить зависимость транспортных потерь от амплитуды тока при различных температурах и внешних магнитных полях, синхронных току. На рисунке 4.13 представлен пример такой оценки для температур 65 К и 40 К и соотношений поля и тока 750, 900 и 1000 А/Тл.

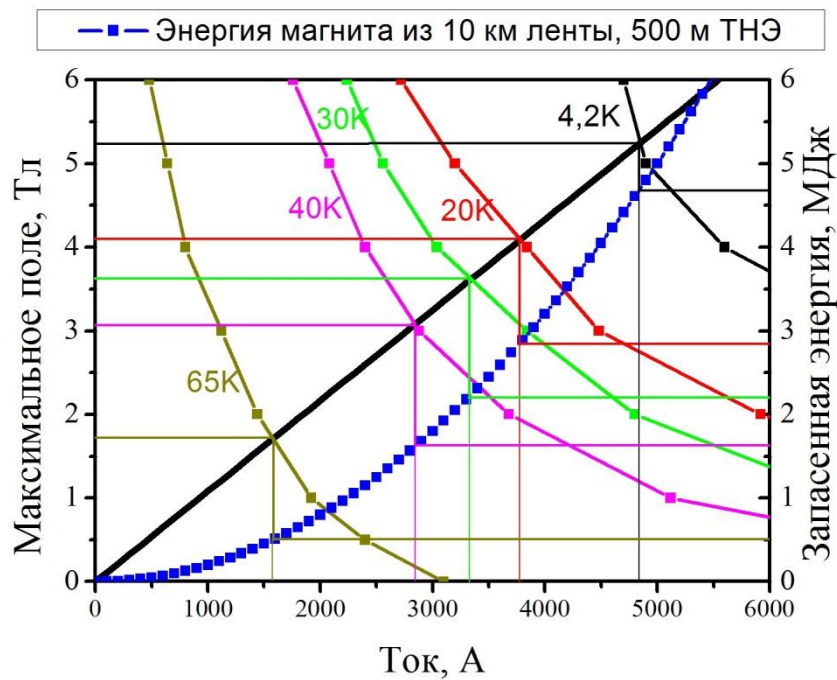


Рисунок 4.12 – Расчет токов, энергий и максимальных полей накопителя из 10км ленты от тока

Таблица 5.6 – 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

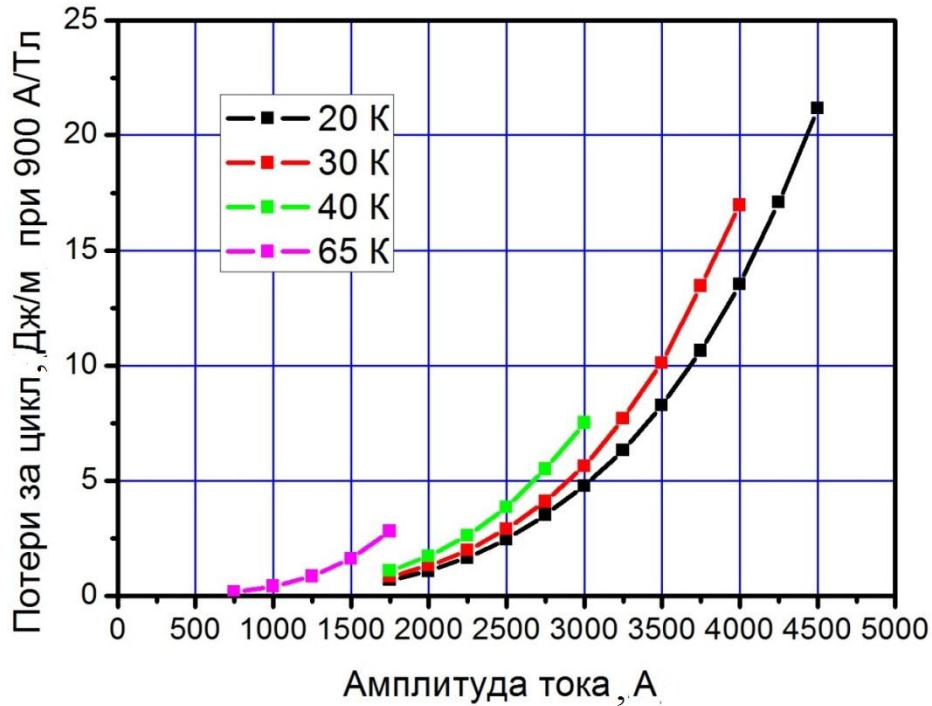


Рисунок 5.13 – Масштабирование потерь в ТНЭ в переменном поле на рабочие температуры и поля СПИН, на участке обмотки с максимальным полем

5.7 Расчеты стабильности ТНЭ в магнитных системах

Для магнитных систем важен численный анализ процесса теплового перехода под действием энергетических возмущений различной природы и интенсивности. Цена ошибки при переходе магнита и допущенном разогреве выше температуры деградации ВТСП – замена секции или всей обмотки. Параметры теплового перехода ТНЭ в магните необходимо знать как с точки зрения выбора рабочего режима, не допускающего переход в несверхпроводящее состояние, так и с точки зрения проектирования системы защиты (обнаружения начала перехода и вывода энергии из обмотки), чтобы предотвратить повреждение, если переход все же происходит. Поскольку гибкий компактный геликоидальный ТНЭ разрабатывается в первую очередь как ТНЭ для крупных магнитных систем и магнитных систем, работающих в импульсном режиме, рассмотрим его стабильность в магнитах.

Факторы, влияющие на стабильность ТНЭ в магните, проявляются в виде энергетических возмущений различной мощности, протяженности во времени и размеров. Причины возникновения этих возмущений описаны в литературном обзоре, там же приведены их характерные параметры для НТСВ и для ВТСП магнитов. Эти энергетические возмущения могут иметь различные размеры и происходить в различных частях обмотки. Интересны энергетические возмущения в тех частях обмотки, где поле максимально, а также там, где поле не максимально, но есть потенциальное «горячее пятно» – локальное понижение токонесущей способности. Энергетическое возмущение может совпасть с «горячим пятном» полностью или частично.

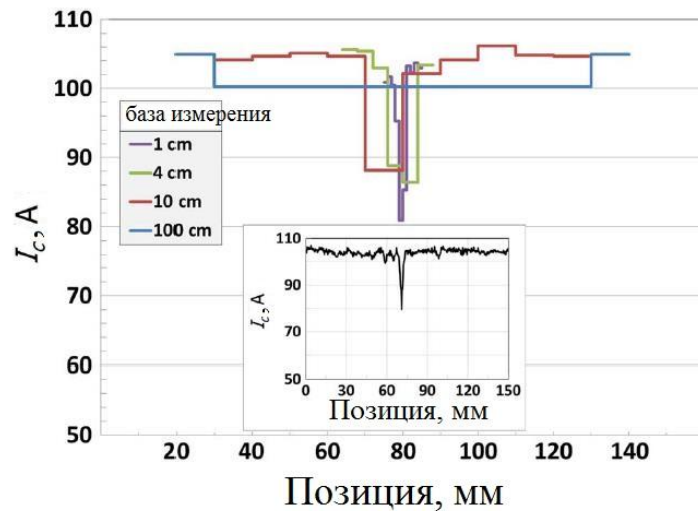


Рисунок 5.14 – Пример неоднородности ВТСП ленты по длине [77]

Для выбора рабочего режима магнитной системы необходимо оценить критические (при которых происходит тепловой переход) энергии возмущений в зависимости от запаса по температуре и параметров возмущений. Для системы защиты необходимо знать характерное время развития теплового перехода (постоянную времени вывода тока) и характерные напряжения при начале теплового перехода (напряжения срабатывания защиты). Напряжение срабатывания защиты выбирается так, чтобы оно было меньше напряжения при начале теплового перехода (верхняя граница). При этом, во-первых, необходимо,

чтобы защитная диагностика чувствовала его на фоне наводок от пульсаций тока источника. Во-вторых, оно должно превышать напряжения, возникающие при энергетических возмущениях, которые еще не вызывают тепловой переход. Согласно этим требованиям напряжение срабатывания должно быть довольно высоким, а не из расчета микровольт на сантиметр на длине порядка сантиметра.

Самый простой способ оценить нижнюю границу критических энергий возмущений – это вычислить энергию адиабатического нагрева области ТНЭ от рабочей температуры до температуры, при которой рабочий ток становится “критическим” по любому подходящему критерию – скажем, 1 мкВ/см или 10-100 мкВ/см в зависимости от рабочей температуры и ВАХ ВТСП. Кроме того, используется приближение однородности температуры по сечению ТНЭ. Такое допущение можно сделать, либо если энергетическое возмущение возникает сразу во всем сечении ТНЭ, либо если поперечная теплопроводность по сечению ТНЭ достаточно высока вследствие плотной структуры ТНЭ.

$$\Delta W = \int_{T_0}^{T_0+T_m} C(T) dT, \quad (5.3)$$

Такая оценка является весьма пессимистической, поскольку при локальном возмущении не учитывает теплосъем за счет теплопроводности вдоль ТНЭ и на соседние витки, и при любом возмущении – теплосъем в хладагент. Некоторые результаты такой оценки представлены в таблицах 5.7 и 5.8 и на рисунке 5.15.

Чтобы вычислить критические энергии тепловых возмущений более точно, необходимо численно решать уравнение теплового баланса в ТНЭ для различной мощности, протяженности и локализации возмущений. Кроме того, таким образом можно получить распределение напряженности электрического поля и температуры в местах понижения токонесущей способности и тепловых возмущений, чтобы правильно применить защиту от перехода и от сгорания при переходе магнитной системы.

При применении систем защиты, основанных на измерении резистивной составляющей напряжения на обмотках, необходимо знать распределения

напряженности электрического поля на ТНЭ, возникающие при критических тепловых возмущениях. В случае применения для защиты системы диагностики с распределенным измерением температуры (например, часто расположенные оптические датчики) необходимо знать распределение температуры при начале перехода, минимальный критический размер области с такой температурой, характерное время развития теплового перехода. В этом случае можно будет правильно выбрать чувствительность датчиков, число датчиков на метр и период опроса датчиков.

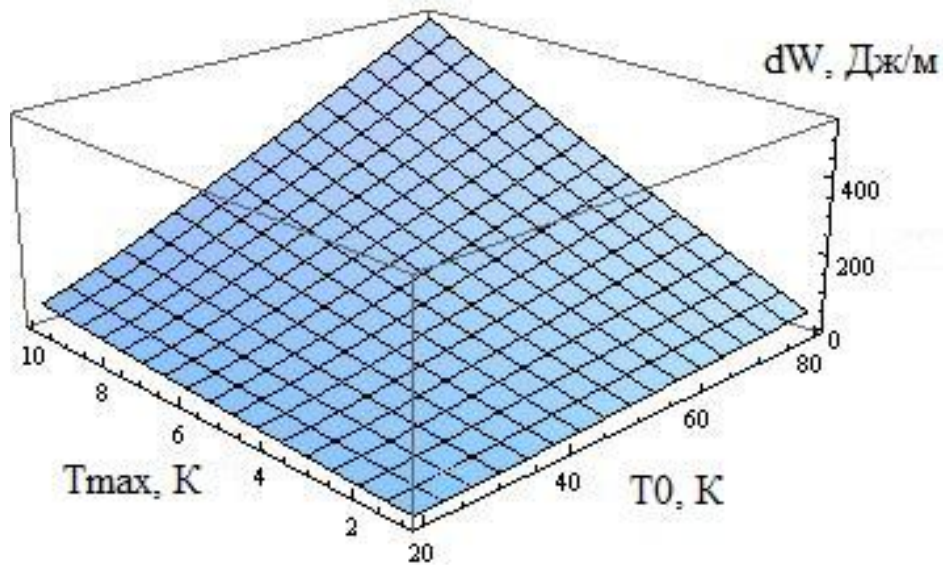


Рисунок 5.15 – Энергии адиабатического нагрева 40-ленточного ТНЭ

Таблица 5.7 – Энергии адиабатического нагрева 16-ленточного и 40-ленточного ТНЭ

Т _{раб.} , К	Q, 16	Q, 16	Q, 16	Q, 16	Q, 16	Q, 16	Q, 40	Q, 40	Q, 40	Q, 40	Q, 40	Q, 40
	лент, Дж/м	лент, Дж/м	лент, Дж/м	лент, Дж/м	лент, Дж/м	лент, Дж/м	лент, Дж/м	лент, Дж/м	лент, Дж/м	лент, Дж/м	лент, Дж/м	лент, Дж/м
	1К	2К	5 К	10 К	300К	500К	1К	2К	5К	10К	300К	500К
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					

Таблица 5.8 – Энергии адиабатического нагрева 20 кА ТНЭ для ТИН

Т _{раб.} , К	Q, Дж/м					
	1К	2К	5 К	10 К	300К	500К
20	11,2	25,5	88	261	110000	230000
30	45	95	266	631		
77	249					

Будем рассматривать участок ТНЭ, находящийся в однородном магнитном поле, максимальном для данной обмотки. Ток рассмотрим стационарный. Будем добавлять различные энергетические возмущения, как находящиеся в области нормальной токонесущей способности, так и совмещенные полностью или частично с участком пониженной токонесущей способности.

Рассмотрим приближение, в котором температура равномерно распределяется по сечению и зависит от координаты вдоль ТНЭ, и от времени (одномерная нестационарная задача). Этот подход будем использовать в случае с “горячим пятном”, а также локальными тепловыми возмущениями.

Тепловой баланс в ТНЭ в предположении одномерной задачи с учетом энергетического возмущения может быть записан как:

$$Q_{resistive} - Q_{conductivity} + Q_{AC} + \Delta Q_{dist}(t, x, r) = Q_{capacity} + Q_{convection}, \quad (5.4)$$

где $Q_{resistive}$ – мощность резистивных потерь в сечении ТНЭ, обусловленных ВАХ ТНЭ,

$Q_{conductivity}$ – мощность теплового потока вдоль длины ТНЭ, может быть как положительной, так и отрицательной, в зависимости от градиента температуры,

$Q_{capacity}$ – мощность, расходуемая на изменение температуры сечения ТНЭ,

$Q_{convection}$ – мощность теплового потока теплового потока, снимаемая охлаждением с поверхности ТНЭ и через внутренний канал проточного охлаждения, если он предусмотрен конструкцией,

$\Delta Q_{dist}(t, x, r)$ – мощность тепловыделения при энергетическом возмущении, зависящая от времени и координат,

Q_{AC} – мощность электрических потерь в изменяющемся поле и при изменяющемся токе,

Уравнение энергетического баланса с учетом ВАХ, энергетических возмущений, теплоемкости, теплопроводности и охлаждения записывается как:

$$I(t)E(I, B, T, x) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \Delta W(t, x) = C \frac{\partial T}{\partial t} + p \alpha (T - T_{out}), \quad (5.5)$$

где I – ток, А

j – плотность тока, А/м²

ρ – удельное сопротивление, Омм,

T – температура сечения, К

x – координата сечения вдоль длины ТНЭ, м

t – время, с

λ – коэффициент теплопроводности метра ТНЭ, Втм/К

C – усредненная теплоемкость ТНЭ на длину, Дж/мК

α – коэффициент теплопередачи в хладагент, Вт/м²К

p – охлаждаемый периметр, м

T_{out} – температура хладагента, К

$\Delta W(t, x)$ – плотность энергетического возмущения, Вт/м³

Вольтамперные характеристики подставляются в уравнение баланса в следующих видах:

$$E(I, B, T, x) = E_0 \left(\frac{I}{I_c(x, B, T)} \right)^{n(B, T)}, \quad (5.6)$$

Вольтамперная характеристика в таком виде (или в еще более упрощенном, где $n = const$), является наиболее приближенной, учитывающей только начальный участок перехода в резистивное состояние. Она может быть использована для несколько пессимистичной оценки начала теплового срыва (хотя и гораздо более точной по энергии возмущения, чем адиабатическая оценка, сильно занижающая критическую энергию), а не для исследования разогрева ТНЭ при переходе. Для исследования всего перехода можно применять комбинированные вольтамперные характеристики, включающие начальную часть (известную из экспериментов),

резистивную часть и промежуточную, с размытием по току. При температуре, превышающей критическую температуру при данном токе и поле, вольтамперная характеристика должна быть полностью резистивной.

Следующим после степенной вольтамперной характеристики приближением является сшивка резистивной функции со степенной:

$$E(x, I, B, T) = E_0 (-I / I_c(x, B, T))^{n(B, T)}, \text{ при } I \leq I_{sh}(x, B, T), \quad (5.7)$$

$$E(x, I, B, T) = I(t) \rho_{ТНЭ}(T), \text{ при } I > I_{sh}(x, B, T), \quad (5.8)$$

При токе сшивки I_{sh} , находимом из уравнения:

$$E_0 \left(\frac{I_{sh}}{I_c(x, B, T)} \right)^{n(B, T)} = I_{sh}(B, T) \rho_{ТНЭ}(T), \quad (5.9)$$

Но она плохо учитывает размытие по току, для ВТСП довольно значительное (в разы).

Поэтому от тока $I_{sh}/2$:

$$E_0 \left(\frac{I_{sh1}/2}{I_c(x, B, T)} \right)^{n(B, T)} = 0,5 I_{sh1}/2(B, T) \rho_{ТНЭ}(T), \quad (5.10)$$

производится сшивка с резистивной функцией, нормированной на тангенс гиперболический:

$$E(x, I, B, T) = E_0 (I(t) / I_c(x, B, T))^{n(B, T)}, \text{ при } 0 < I(t) \leq I_{sh1/2}(B, T), \quad (5.11)$$

$$E(x, I, B, T) = \rho_c(T) I(t) 0.5 (1 + \text{Tanh} (I(t) - I_{sh1/2}(B, T)) / I_0(B, T)), \quad (5.12)$$

при $I(t) > I_{sh1/2}(B, T)$

Параметр размытия пропорционален $I_c(x, B, T)$. Такое приближение показало удовлетворительное соответствие с экспериментальными данными, полученными при возмущении геликоидального ТНЭ импульсным током, глава 4, и при возмущении импульсным полем ТНЭ для СОТ, глава 2. Для еще более достоверного приближения расчета температуры при переходе возможно измерение ВАХ ВТСП лент и ТНЭ в импульсном режиме до уровней в единицы и десятки мВ/см, при стабилизации температуры образцов. Для НТСП при температуре жидкого гелия такие измерения не будут давать сколько-нибудь

достоверных данных. Для ВТСП же при температурах от 10 К и выше точность подобных измерений, при условии дополнительного измерения температуры и поправок на дрейф температуры, может быть практически пригодна. Это связано с такими факторами, как стабильность ВТСП к скорости ввода тока, значительно более высокая теплоемкость материалов при промежуточных температурах и значительно меньшая температурная зависимость криттока ВТСП из-за его высоких критических температур.

Моделирование теплового перехода в ТНЭ производится с учетом конкретной конструкции ТНЭ и магнита, способа и интенсивности охлаждения, максимальных возможных тепловых возмущений различной локализации и протяженности, и максимально возможных «провалов» токонесущей способности. Ниже приведены некоторые промоделированные ситуации в двух разных конструкциях ТНЭ в различных рабочих режимах. ВТСП ленты во всех случаях рассматриваются SuperPower SCS 4050 AP 2010 года производства.

1. ТНЭ для импульсного магнита (например, СПИН) из 40 ВТСП лент на трубке из меди М1 диаметром 6,35 мм толщина стенок 0,75 мм, ток 5 кА, поле 5,5 Тл, рабочая температура 20 К, запас по температуре 5 К, охлаждение двух типов:

- «мощное» – проточное жидким водородом через формер, см. рисунок 5.16.
- «слабое» – проточное газообразным гелием через формер и, дополнительно, контактное охлаждение через обмотку, мощность на 1-2 порядка меньше, чем при охлаждении жидким водородом в максимуме, зависимость от температуры линейная: $500(T-T_{out})$ [Вт/м²] для внутренней и внешней поверхности ТНЭ.

Критический ток $I_c(x)$ рассматривался в следующих вариантах:

- константа;
- с провалом до 0,9 на длине 1 см.

Энергетические возмущения рассматривались двух типов:

- постоянное тепловыделение на всем моделируемом участке;

- тепловыделение в течение 0,2 секунд на участке 1 см, не совпадающем с участком пониженной токонесущей способности.

Длина моделируемого участка ТНЭ составляла 0,1 метра.

- ТНЭ для термоядерного источника нейтронов (ТИН) из 286 лент на закругленном полом с плоскими сторонами формере из меди М00. Ток 20 кА, поле 12 Тл, рабочая температура 20 К, запас по температуре 10 К. Варианты охлаждения, зависимости токонесущей способности от координаты и энергетических возмущений такие же, как для 1-го ТНЭ, только длины падения токонесущей способности и энергетического возмущения 2 см, а длина моделируемого образца 0,2 метра.

При моделировании использовалась вольтамперная характеристика в виде:

$$E(I, B, T, x) = E_0 \left(\frac{I}{I_c(x, B, T)} \right)^{30}$$

Результаты численного моделирования некоторых характерных случаев развития тепловых процессов приведены на рисунках.

Для ТНЭ из 10 слоев 40 лент с $T_0 = 20$ К, $T_m = 5$ К, охлаждение жидким водородом, возмущение «объемное», по всей длине, на рисунке 5.17 а показано развитие теплового перехода при однородном распределении токонесущей способности вдоль ТНЭ. На рисунке 5.17 б показано развитие перехода при таком же тепловом возмущении и охлаждении, но при наличии понижения токонесущей способности до 90% на участке длиной 10 мм.

В том и в другом случае критическая энергия возмущений близка по значению – около 250 Дж/м. На рисунке 5.17 б видно повышение температуры участка с неоднородностью ВАХ, причем превышение температуры этого участка над окружающими участками началось уже при развивающемся тепловом срыве. До развития теплового срыва относительно мощное охлаждение компенсировало разогрев участка с пониженной токонесущей способностью.

На рисунках 5.18 а и б показаны тепловые процессы в том же ТНЭ из 40 ВТСП лент на медной трубке при тепловых возмущениях на всей длине, но при охлаждении, на 2 порядка менее мощном (проток газообразного гелия и

теплопроводность обмотки). На рисунке 5.18 б видно, что переход начинается на участке ТНЭ с локальным понижением криттока. В этом случае, во-первых, критические энергии в разы меньше, чем при охлаждении жидким водородом, во-вторых, локальное снижение криттока ТНЭ влияет на критическую энергию перехода – 60 Дж/м на «проблемном» участке и 80 Дж/м на «нормальном» участке.

На рисунке 5.19 показана работа ТНЭ с постоянным тепловым возмущением, не достаточным для нагрева выше запаса по температуре – температура стабилизировалась, переход не развивается.

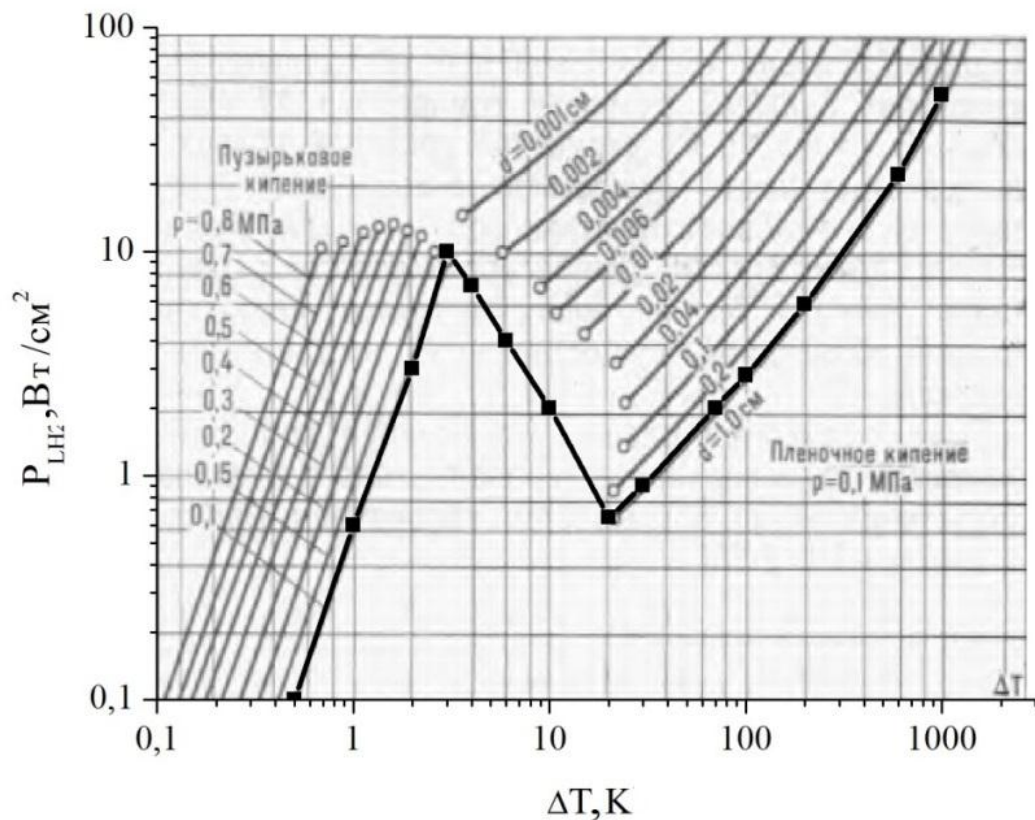


Рисунок 5.16 – Мощность охлаждения жидким водородом в зависимости от температуры [66]

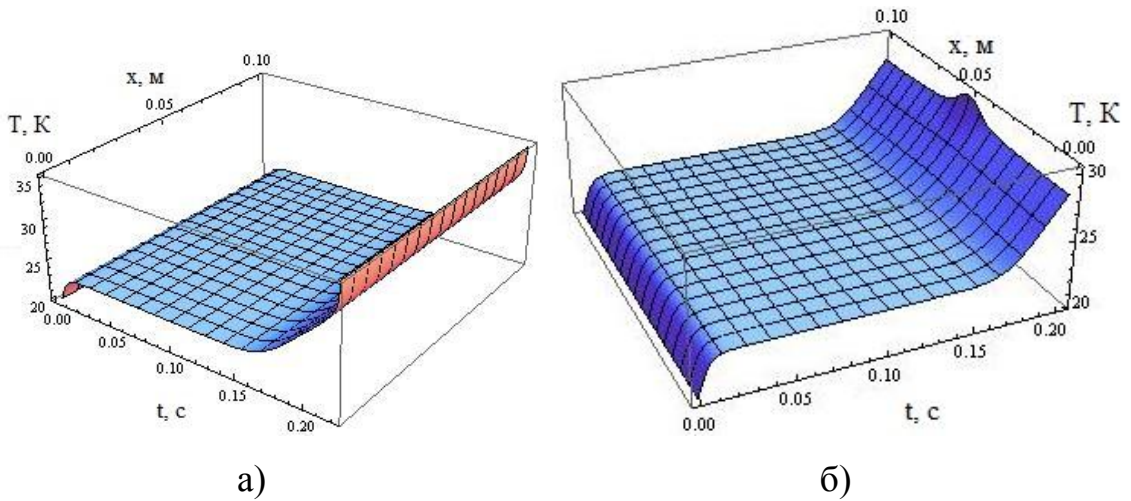


Рисунок 5.17 – Мощность возмущения 1,5кВт/м, время 0,2с, проточное охлаждение жидким водородом $I_c(x) = const$ (а); $I_c(x) = 0,9$ на 10 мм длины (б)

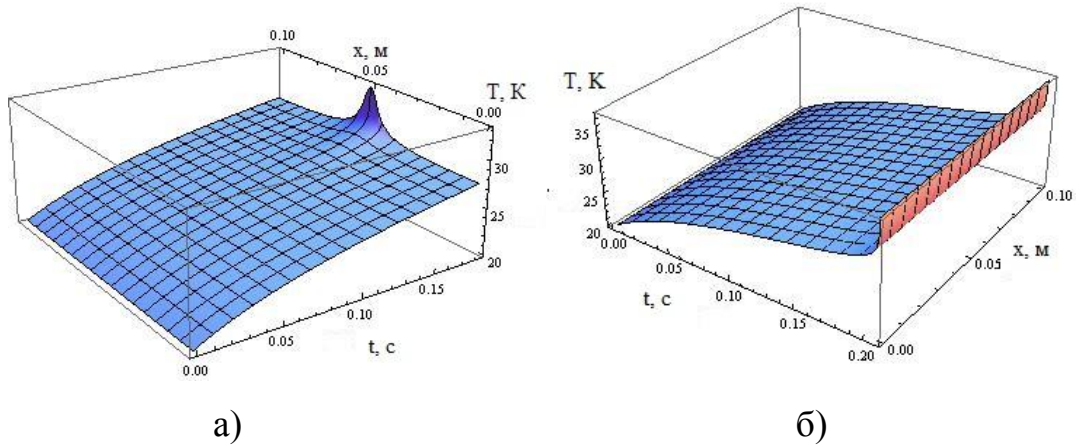


Рисунок 5.18 – Тепловые возмущения мощность 300Вт/м, время 0,2с, $I_c(x)=0,9$ на 10 мм (а); мощность 400Вт/м, время 0,2с, $I_c(x)=const$ (б)

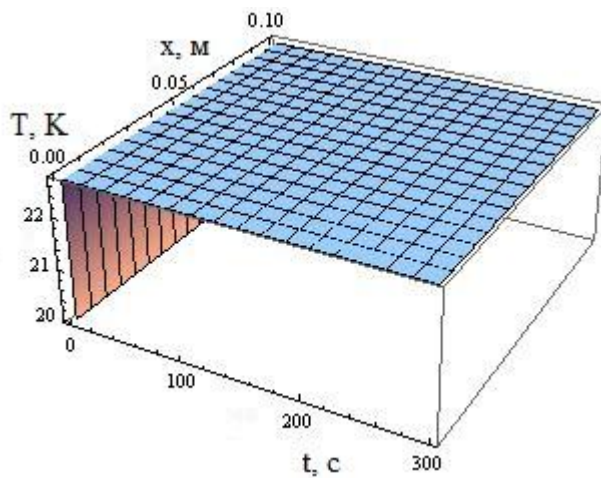
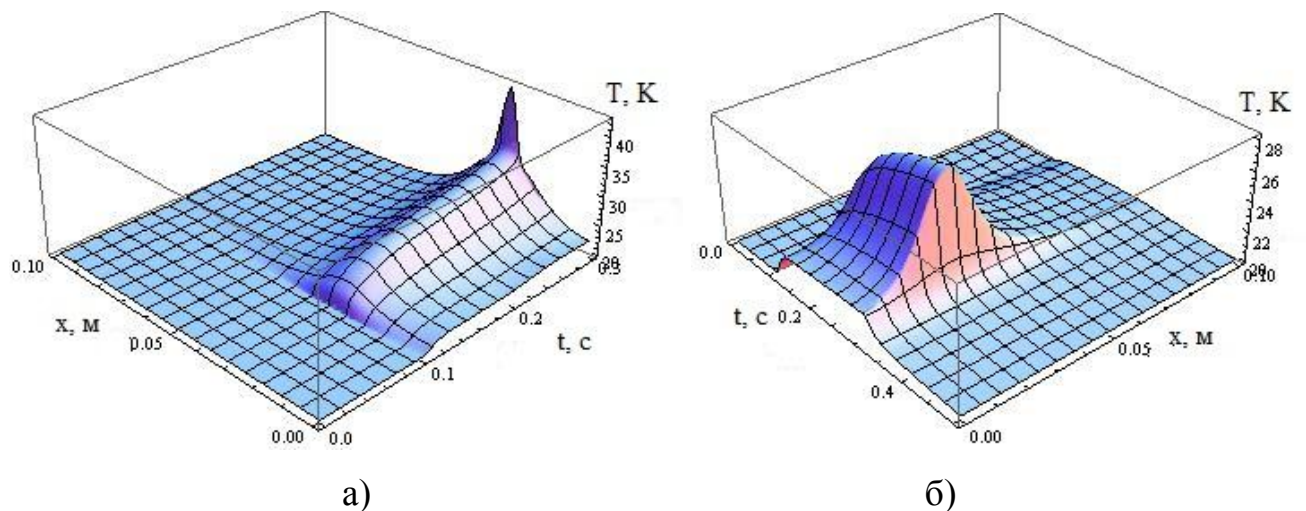


Рисунок 5.19 – Мощность тепловыделения 1,2 кВт/м, охлаждение жидким водородом

При моделировании вышеописанных тепловых возмущений обнаружено, что мощность охлаждения сильно влияет на величину критической энергии при нелокальном возмущении, неоднородность токонесущей способности почти не влияет на критическую энергию при мощном охлаждении, но влияет при более «слабом» охлаждении.

Действие локальных (10 мм) тепловых возмущений протяженностью 0,2 секунды на тот же ТНЭ при тех же рабочих условиях и охлаждении жидким водородом показаны на рисунках 5.20 а и б. На рисунке 5.20 а показано возмущение с энергией выше критической, которое привело к тепловому срыву. На рисунке 5.20 б показано возмущение с энергией меньше критической, которое вызвало разогрев выше запаса по температуре, но по окончании возмущения из-за охлаждения и теплоотвода за счет продольной теплопроводности ТНЭ вернулся в сверхпроводящее состояние.



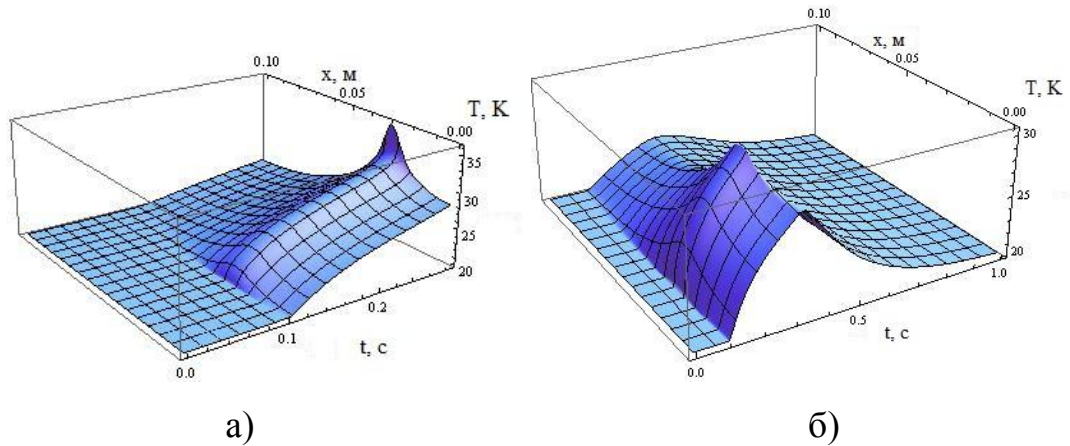
В обоих случаях проточное охлаждение жидким водородом, $I_c(x) = const$

Рисунок 5.20 – Тепловое возмущение мощностью 4.25 кВт/м (а); 4 кВт/м (б),

Критическое возмущение энергии составило чуть выше 800 Дж /м (8 Дж).

На рисунках 5.21 а и б показано действие локальных возмущений на такой же ТНЭ, охлаждаемый газообразным гелием и контактно через обмотку, с примерно в 100 меньшей мощностью теплосъема, чем при охлаждении жидким водородом. Видно, что, несмотря на охлаждение, на 2 порядка более слабое,

критическая энергия локального возмущения меньше всего в 2 раза – 400 Дж/м (4 Дж). Это объясняется ролью продольной теплопроводности ТНЭ в рассеивании энергии теплового возмущения.



Охлаждение протоком газообразного гелия и контактное

Рисунок 5.21 – Мощность теплового возмущения 2 кВт/м, $I_c(x)=const$ (а);
мощность теплового возмущения 1.8 кВт/м, $I_c(x)=const$ (б),

На рисунке 5.22 показано действие локального теплового возмущения на участок ТНЭ, соседний с участком с пониженной токонесущей способностью – оно ничем не отличается от влияния возмущения при отсутствии понижения токонесущей способности. В центре образца, где находится «слабое место» ТНЭ с 90% криттока, не видно никакой особенности распределения температуры, что можно более подробно увидеть на рисунке 5.22 б.

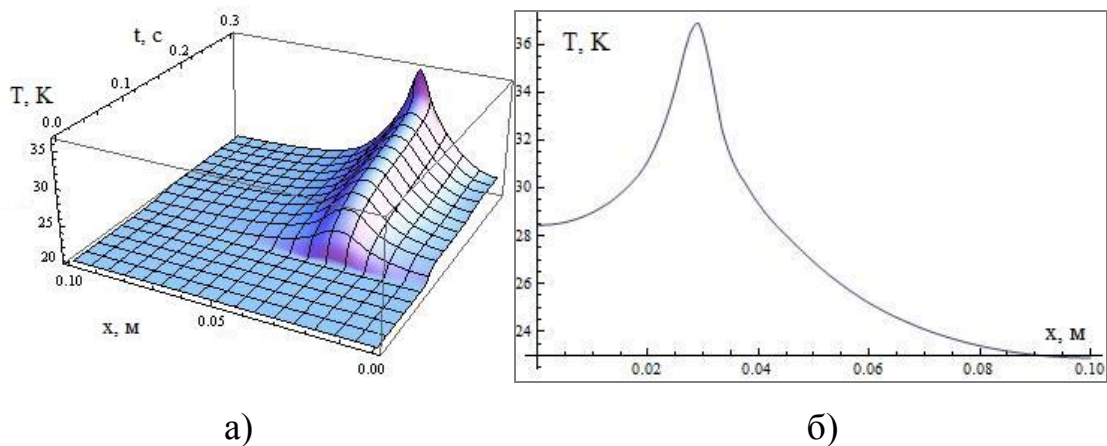
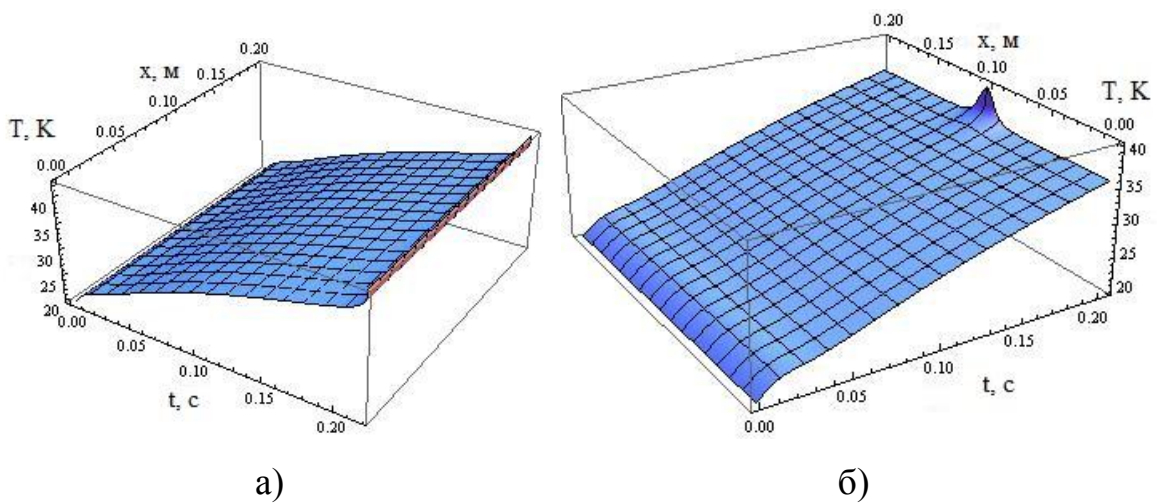


Рисунок 5.22 – Распределение температуры по длине ТНЭ с локальным понижением криттока, при локальном тепловом возмущении от времени (а);
при тепловом срыве (б)

Таким образом, показано, что мощность охлаждения при локальных тепловых возмущениях меньше влияет на критическую энергию, поскольку при точечном возмущении продольная теплопроводность ТНЭ рассеивает значительное количество энергии. Неоднородность токонесущей способности не влияет на критическую энергию теплового срыва при любом охлаждении, если локальное возмущение не происходит непосредственно на «слабом месте» ТНЭ.

На следующей серии рисунков показаны результаты численного моделирования тепловых процессов при возмущениях в сильноточном ТНЭ, который может быть применен для токамака ТИН. Этот перспективный ТНЭ, рассматриваемый в данной работе, представляет собой 286 ВТСП лент, намотанных в 32 слоя на закругленный полый медный формер с плоскими сторонами, с размерами $\sim 13 \times 7$ мм. Сам ТНЭ имеет внешние размеры $\sim 19 \times 14$ мм. Количественное соотношение меди к другим материалам меньше, чем у рассмотренного выше ТНЭ из 40 лент. Рабочий ток составляет 20 кА в максимальном поле 12 Тл при температуре 20 К, с запасом по температуре 10 К.

На рисунке 5.23 а показан тепловой срыв под воздействием объемного теплового возмущения в ТНЭ с однородной токонесущей способностью. На рисунке 5.23 б показан тепловой срыв, который начался на участке ТНЭ со «слабым местом», имеющим 90% критток.

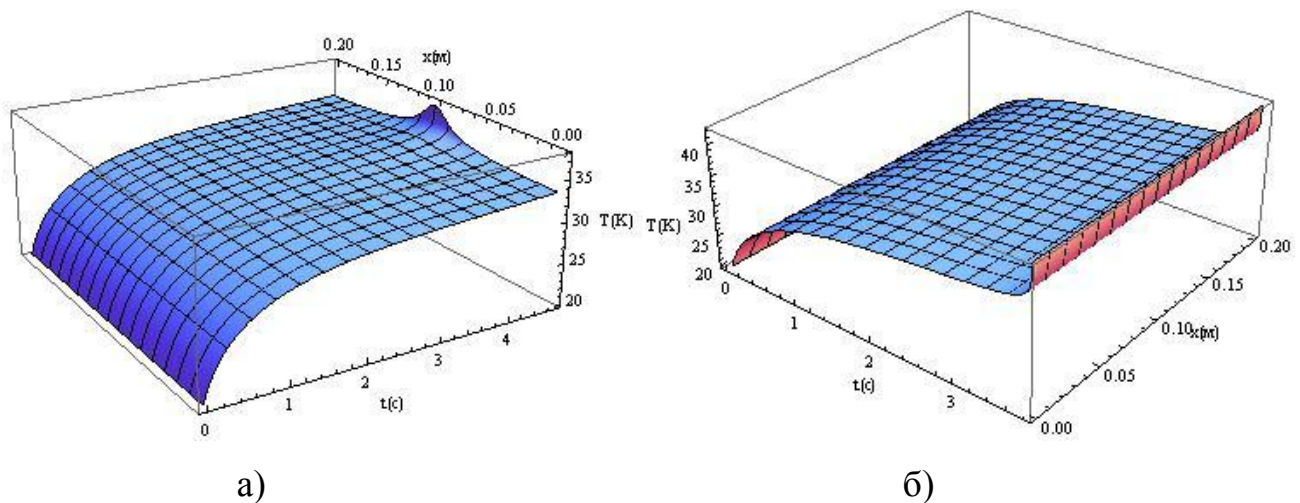


В обоих случаях проточное охлаждение жидким водородом

Рисунок 5.23 – Мощность теплового возмущения 4 кВт/м, $I_c(x)=const$ (а); мощность теплового возмущения 3,5 кВт/м, I_c составляет 0,9 на участке 20 мм (б)

Из-за меньшего удельного веса стабилизирующей меди в данном ТНЭ, во-первых, критические энергии возмущений (800 и 700 Дж/м) при запасе в 10 К всего в 3 раза больше, чем у 40 ленточного, во-вторых, заметнее влияние локального понижения криттока на критическую энергию теплового возмущения.

На рисунках 5.24 а и б показано влияние объемного продолжительного теплового возмущения на такой же ТНЭ при «слабом» охлаждении как при наличии локального понижения криттока, так и при однородной токонесящей способности. За счет значительного запаса по температуре ТНЭ выдерживает длительный нагрев с мощностью, близкой к критической, и затем срывается. При наличии «слабого места» срыв, как видно на рисунке 5.24 а, локальный и начинается при меньшей мощности, чем при однородном критическом токе, как показано на рисунке 5.24 б.



в обоих случаях охлаждение протоком газообразного гелия и контактное

Рисунок 5.24 – Мощность теплового возмущения 500Вт/м, $I_c(x)=0,9$ на 20 мм участке (а); мощность 600Вт/м, $I_c(x)=const$ (б)

На рисунках 5.25 а и б показаны случаи стабилизации температуры ТНЭ при постоянном объемном тепловом возмущении с мощностью незначительно меньше критической.

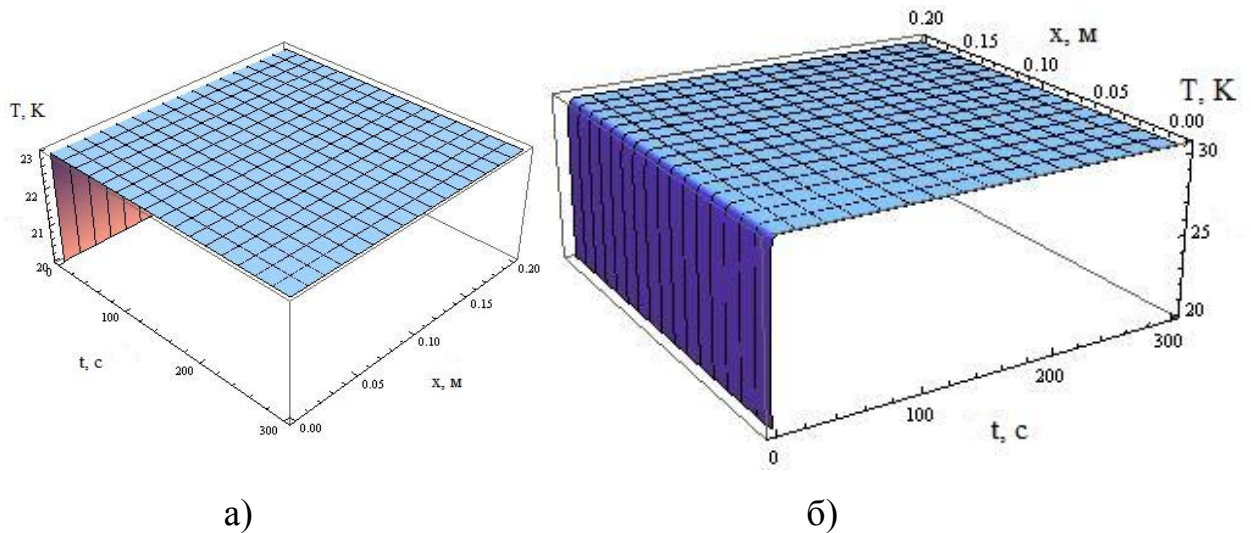
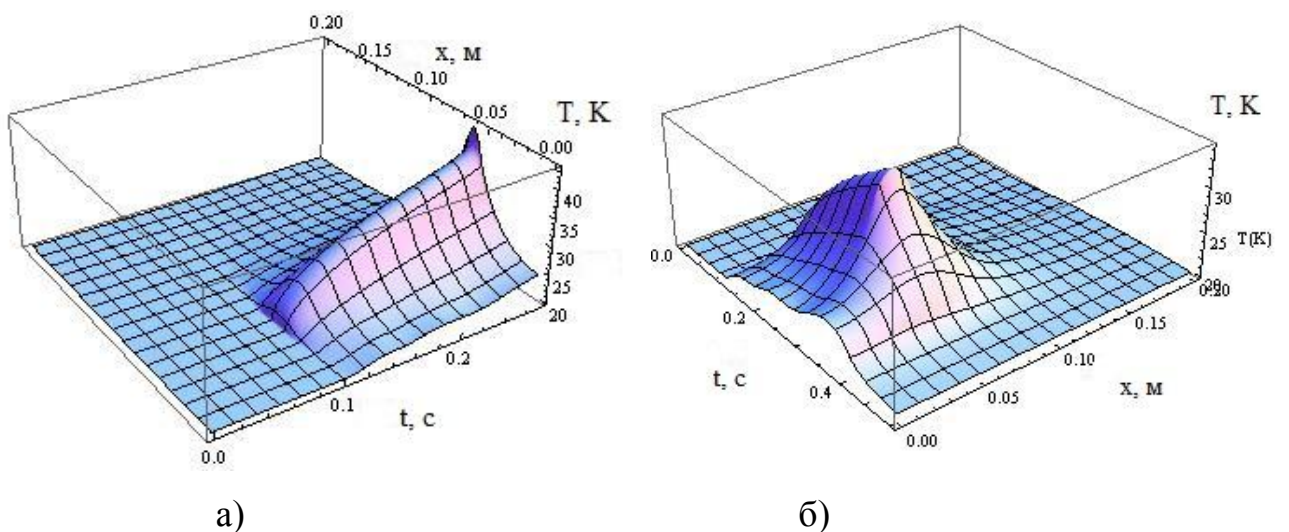


Рисунок 5.25 – Охлаждение жидким водородом, мощность теплового возмущения 2,5 кВт/м (а); охлаждение газообразным гелием и контактное через обмотку, тепловыделение 0.4 кВт/м (б)

Для данного ТНЭ также моделировались локальные (на участке 20 мм) тепловые возмущения длительностью 0,2 секунды. На рисунке 5.26 а показан тепловой срыв в ТНЭ в результате возмущения с энергией, большей критической, а на рисунке 5.26 б процесс возвращения в сверхпроводящее состояние после разогрева локальным некритическим возмущением до температуры выше запаса. Моделировалось охлаждение жидким водородом.



В обоих случаях проточное охлаждение жидким водородом, $I_c(x)=const$

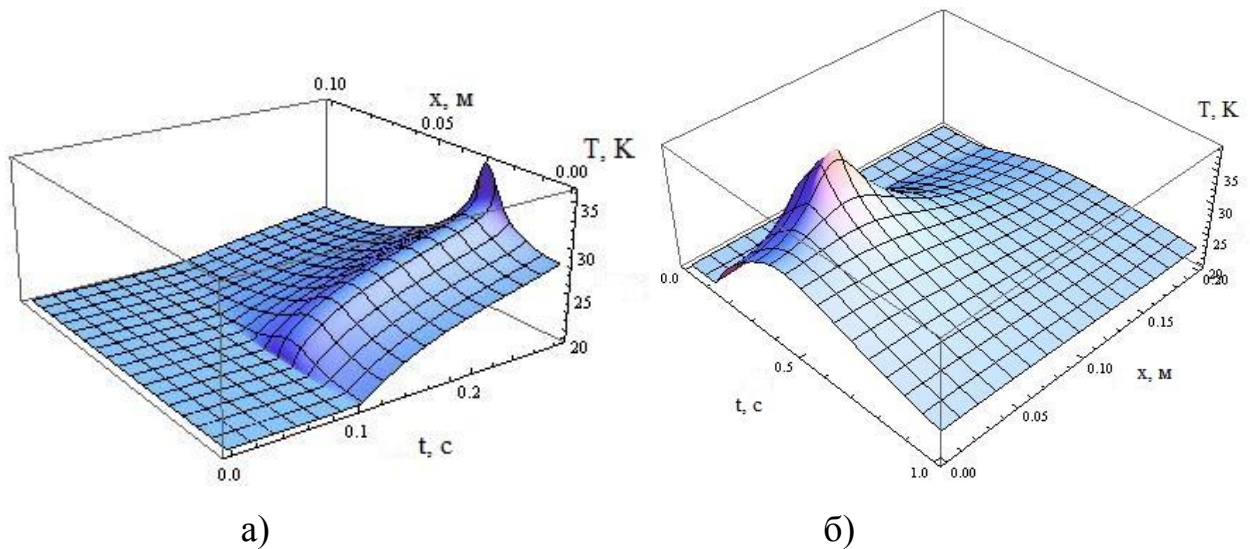
Рисунок 4.26. Тепловое возмущение мощностью 13 кВт/м (а); 10 кВт/м (б)

Критическая энергия возмущения составила около 50 Дж (2,5 кДж/м).

На рисунках 5.27 а и б показаны такие же процессы при «слабом» охлаждении.

Значение критической энергии возмущений лежит в диапазоне между 40 и 44 Дж (2-2,2 кДж/м), т.е. незначительно ниже, чем при охлаждении жидким водородом. Для данного ТНЭ мощность охлаждения влияет на критическую энергию локального теплового возмущения незначительно, по сравнению с продольной теплопроводностью ТНЭ, рассеивающей энергию локального теплового возмущения.

Оценки значений критических энергий тепловых возмущений перспективного ТНЭ для ТИН приведены в таблице 5.9. Они сравниваются с масштабами критических возмущений НТСП ТНЭ такого же класса. Показано, что при рассматриваемых рабочих температурах ВТСП ТНЭ имеет на 2-3 порядка более высокую термодинамическую стабильность.



В обоих случаях охлаждение газообразным гелием и через обмотку, $I_c(x)=const$
 Рисунок 4.27 – Мощность локального теплового возмущения 11 кВт/м (а);
 10 кВт/м (б)

Таблица 5.9 – Сравнение критических энергий ТНЭ 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 20 К + 10 К, GHe	Объемное длительное	0.5	10 ⁶		~10 ⁶
	Локальное 2 см 0.2 с			2	4*10 ⁶
ТНЭ ТИН из 286 лент 20 К + 10 К, LH ₂	Объемное длительное	3-4	6-8*10 ⁶		~10 ⁶
	Локальное 2 см 0.2 с			2.5	5*10 ⁶
ТНЭ ТИН из 286 лент 10 К + 5 К, GHe			~10 ⁵		~10 ⁵
НТСП, 5 К + 1 К, LHe аналогичного класса				0.5-5*10 ⁻³	~10 ³⁻⁴

Даже если рассматривать комбинированную магнитную систему с высокополевой вставкой из ВТСП ТНЭ, работающую при проточном охлаждении жидким гелием, стабильность ВТСП части все равно будет на порядок выше. Это объясняется тем, что из-за высокой критической температуры ВТСП керамики ВТСП ТНЭ при рабочей температуре 5 К и запасе по току всего 20% будет иметь запас по температуре ~5 К. Кроме того, высокая рабочая плотность тока ВТСП в высоких магнитных полях позволяет размещать в ВТСП ТНЭ дополнительное сечение стабилизирующей меди по сравнению с ниобий-оловянным ТНЭ в тех же полях.

Выводы по расчетным исследованиям стабильности следующие:

1. Мощность охлаждения в разы повышает критические энергии возмущения при равномерном длительном возмущении.
2. Неоднородность токонесущей способности почти не влияет на переход при мощном охлаждении, но снижает критические энергии возмущения при «слабом» охлаждении.
3. При локальном кратковременном возмущении охлаждение мало влияет на критическую энергию возмущения.
4. 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 и тому подобное; 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.

Выводы по главе 5:

1. Разработана методика 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.
2. Рассмотрены перспективы применения геликоидального ТНЭ в магнитных системах токамаков, в плазменных межорбитальных двигателях, для радиационной защиты космических аппаратов, в индуктивных накопителях энергии.

Произведено обоснование и даны рекомендации по применению ТНЭ в устройствах:

- магнитная система импульсного СПИН мегаджоульного класса в виде катушки Брукса;
- магнитная система токамака ТИН (термоядерный источник нейтронов);
- магнитные системы плазменных электрореактивных двигателей мощностью 1-200 МВт;
- магнитная экранировка космических кораблей;
- гибкие токоподводы с проточным охлаждением газообразным гелием для магнитных систем ускорителей частиц.

Создан прототип гибкого токоподвода с проточным охлаждением.

3. Тепловые процессы в различных устройствах из геликоидального ТНЭ численно исследованы по методике, предварительно проверенной при обсчете экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны различные конструкции и изготовлены образцы токонесущих элементов для СОТ резистивного типа из 2, 3 и 6 лент SF12100 на токи 250, 450 и 900 А rms. Проведены экспериментальные исследования и численное моделирование этих элементов в составе токоограничивающих элементов или макетов, а также исследования единичных ВТСП лент.

Исследованы:

- токонесущая способность на постоянном и переменном токе ТНЭ и лент (получена токонесущая способность, приблизительно, с учетом неоднородности токонесущей способности по длине ленты, равная сумме токонесущих способностей лент);
- распределение токов между лентами ТНЭ, влияние спаев с токовводами и индуктивности отдельных лент на переменном токе;
- проблема горячих пятен и распространение резистивного состояния при тепловых возмущениях лент и ТНЭ импульсным током;
- потери на переменном токе в лентах и ТНЭ;
- влияние собственного поля на крайних лентах крайних витков на токонесущую способность и потери на 3-витковых макетах СОТ.

В ходе исследований проработан подход к:

- конструкциям прототипов ТНЭ и СОТ, а также к методике автоматизированной намотки токоограничивающих элементов, создано экспериментальное устройство для автоматизированной намотки модулей СОТ;
- методам защиты ТНЭ от перегорания – защитная дополнительная резистивная лента и рекомендации по защите отключением;
- конструкциям спаев ВТСП ТНЭ с медными токовыми терминалами, позволяющим обеспечить более равномерное распределение токов;
- устранению эффекта собственного поля на краях обмотки с помощью дополнительных ВТСП лент, шунтирующих крайние ленты крайнего витка

- численному моделированию режимов работы резистивных СОТ различных конструкций.
2. Изготовлены и исследованы токоограничивающие элементы из 2 параллельных лент на 380 В 250 А rms. Исследовался режим токоограничения и рабочий режим. На основе 8 последовательных элементов собран СОТ на 3,5 кВ 250 А rms, он испытан в рабочем режиме и в режиме токоограничения путем разряда батареи конденсаторов до 4 кВ.
 3. На основе результатов исследования макетов СОТ с 6-ленточным токоограничивающим элементом и результатов испытаний СОТ на 3,5 кВ разработан проект СОТ на 27,5 кВ 900 А rms. Его токоограничивающие элементы располагаются на коаксиальных цилиндрах большого диаметра, на которые встречно (с целью снижения индуктивности) намотан 6-ленточный ТНЭ.
 4. Изготовлены и исследованы образцы гибких сильноточных ТНЭ из ВТСП лент, намотанных в несколько встречных слоев геликоидально по 4 параллельных ленты на гибкие формеры. Проведены следующие экспериментальные исследования:
 - токонесущая способность различных ВТСП лент в зависимости от деформации, аналогичной деформации при изготовлении ТНЭ, и выбор ВТСП лент для ТНЭ;
 - токонесущая способность на постоянном и переменном токе ТНЭ и отдельной ленты в собственном и внешнем поле (получена токонесущая способность ТНЭ, приблизительно, с учетом неоднородности токонесущей способности по длине ленты, равная сумме токонесущих способностей лент) при различных условиях, в том числе в гелии в поле несколько Тл;
 - потери на переменном токе ТНЭ и отдельной ленты в собственном и внешнем поле;
 - зависимость токонесущей способности ленты в поле от деформации растяжения и сжатия;

- зависимость токонесущей способности ТНЭ от деформации изгиба и поперечного сжатия (как в обмотке);
- зависимость токонесущей способности и потерь от условий охлаждения (теплоизоляция);
- стабильность и тепловой срыв ТНЭ при импульсном сверхтоке.

Проведены аналитические и численные расчетные исследования:

- расчет распределения поля собственного тока и оценка его влияния на токонесущую способность ТНЭ по сравнению с токонесущей способностью ВТСП ленты;
- расчеты деформации лент при изготовлении ТНЭ и влияния этой деформации на токонесущую способность ТНЭ, а также расчеты допустимого изгиба ТНЭ;
- расчеты теплового баланса и критических энергий теплового срыва в некоторых режимах работы ТНЭ (в том числе в обмотках магнитных систем и при условиях, которые были осуществлены в экспериментах, для проверки методики).

5. Изготовлено экспериментальное автоматизированное универсальное устройство для производства геликоидального ТНЭ и намотки магнитных систем из него. Разработан способ изготовления длинномерных кусков геликоидального ТНЭ различных конструкций.

6. Выработаны рекомендации по применению геликоидального ТНЭ различных конструкций в следующих устройствах:

- магнитная система токамака ТИН (термоядерный источник нейтронов)
- магнитные системы плазменных электрореактивных двигателей мощностью 1-200 МВт;
- магнитная экранировка космических кораблей;
- гибкие токоподводы с проточным охлаждением газообразным гелием (для магнитных систем ускорителей частиц, космических систем, флота и авиации);

- магнитная система импульсного СПИН мегаджоульного класса в виде катушки Брукса.

7. Выработаны рекомендации производителям ВТСП лент для их применения в высоковольтных ТНЭ термоядерных устройств, импульсных и крупных магнитных систем, токоограничителей.

Выводы:

1. На основании проведенных расчетных и экспериментальных исследований подготовлены научно обоснованные рекомендации для конструкций высоковольтных ВТСП-2 ТНЭ, оптимизированных для ряда конкретных применений в магнитных системах и электроэнергетических устройствах различного назначения. Разработаны конструкции высоковольтного геликоидального ТНЭ, изготовлены и исследованы образцы.
2. Выработан подход к изготовлению ТНЭ, позволяющих 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.
3. Разработан способ изготовления длинномерных (100 и более метров) кусков высоковольтного геликоидального ТНЭ с рабочими токами до 100 кА и создано соответствующее опытное производство.
4. Разработаны конструкции высоковольтных ТНЭ с рабочими токами до 900 А для токоограничивающих модулей и резистивных СОТ на напряжение до 27,5 кВ, создано экспериментальное устройство для их изготовления.
5. Проведенные исследования и разработки резистивных СОТ позволили приступить к созданию ряда промышленных устройств ограничения тока короткого замыкания для распределительных электросетей с различными требуемыми параметрами (рабочие токи 0.25-2 кА, напряжения до 35 кВ, время восстановления 1-5 секунд).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jean Luc Duchateau, Reinhard Heller, HTS4Fusion Conductor – Workshop // Which Superconducting Magnets for DEMO and Future Fusion Reactors? — Karlsruhe, Germany.
2. Gourab Bansal, Feasibility Studies on Large-Current Capacity HTS Conductors for Fusion Magnets, 2008.
3. Yukikazu Iwasa, Stability and protection of superconducting magnets. A Discussion // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — №15, — Vol 2. — 2005.
4. William J. Nuttall, Richard H. Clarke, Bartek A. Glowacki, Beyond the Helium Conundrum // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — №23, — Vol 3. — June 2013.
5. D.C. van der Laan et. Al, EPRI Superconductivity Conference // RE-Ba₂Cu₃O₇- d coated conductor helical cables. — Tallahassee, FL, 2011.
6. Naoki Hirano, Shigeo Nagaya, Hiroshi Kawashima, Kohei Higashikawa, Taketsune Nakamura, Koji Shikimachi, System Coordination of 2 GJ Class YBCO SMES for Power System Control // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — №19, — Vol 3. — 2009.
7. M. Takayasu et al., HTS twisted stacked-tape cable conductor// Super-conductor Science Technology. — №1, — Vol. 25. — 2012.
8. N V Bykovsky, S S Fetisov, A A Nosov, V V Zubko and V S Vysotsky, Analysis of critical current reduction in self-field in stacked twisted 2G HTS tapes// Journal of Physics: Conference Series 507 — 2014.
9. M P Staines, R A Badcock, N J Long, M Majoros, E W Collings, M D Sumtion L S Lakshmi, Frequency dependence of magnetic ac loss in a Roebel cable made of YBCO on a Ni-W substrate // Supercond. Sci. Technol. — №23, — 2010.
10. W. Goldacker et. al., CCA-2009 // Possible new concepts for AC CC-cables with very high currents. — Barcelona, 2009.

11. Takashi Yazawa et. al., CCA08 // Fault current limiter using coated conductors. — Houston, 2008.
12. V.V. Lobyntsev, M.S. Novikov, S.I. Novikov, V.I. Shcherbakov V.E. Keilin, Investigation of Current Distribution in Multi-Tape HTS Samples // Physics Procedia. — №36, — 2012. — с. 1225 – 1230.
13. D C van der Laan, YBa₂Cu₃O_{7-δ} coated conductor cabling for low ac-loss and high-field magnet applications // Supercond. Sci. Technol. — №22, — 2009.
14. D C van der Laan, X F Lu, L F Goodrich, Compact GdBa₂Cu₃O_{7-δ} coated conductor cables for electric power transmission and magnet applications // Supercond. Sci. Technol. — №24, — 2011.
15. [Материалы сайта компании Advanced Conductor Technologies LLC] URL: <http://advancedconductor.com/>.
16. L F Goodrich, T J Haugan, D C van der Laan, High-current dc power transmission in flexible RE-Ba₂Cu₃O_{7-δ} coated conductor cables // Supercond. Sci. Technol. — №25, — 2012.
17. Luisa Chiesa, Leslie Bromberg, Joseph V Minervini, Makoto Takayasu, HTS twisted stacked-tape cable conductor // Supercond. Sci. Technol. — №25, — 2012.
18. Danko van der Laan et.al., Second HTS4Fusion Conductor Workshop // Development of HTS Conductor on Round Core (CORC) cables for fusion applications at Advanced Conductor Technologies. — Villigen, Switzerland, 2014.
19. D. van der Laan, M. Takayasu, K.-P. Weiss, W. Goldacker, C. Barth, ASC2012 // Measurements of HTS cables in a temperature range of 4.2 K to 80 K and background fields up to 12 T. — Portland, OR, 2012.
20. Б.Н. Колбасов, С.А. Лелехов, И.О. Анашкин, П.П. Хвостенко, П.Д. Вэн, А. Нисимура, Ё.К. О4, В.Дж. Пан, С. Прадхан, Ю.Т. Сон, А.Н. Шарма, Д.П. Иванов, Необходимость повышения надёжности сверхпроводящих магнитных систем с принудительным охлаждением // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. — Выпуск 1. — 2012.

21. C. Bayer, K.-P. Weiss, W. Fietz, R. Heller, V. Gade, Second HTS4Fusion Conductor Workshop // Conceptual design of an HTS TF coil for DEMO. — Villigen, Switzerland, 2014.
22. Giuseppe Celentano et.al. HTS4Fusion Conductor Workshop // Recent developments of the ENEA HTS cable-in-conduit conductor with dual channel. — Villigen, 2014.
23. N. Bykovsky, R. Wesche, P. Bruzzone, D. Uglietti, Development of HTS Conductors for Fusion Magnets //. — 2014.
24. Nagato Yanagi, Hidetoshi Hashizume, Akio Sagara, Satoshi Ito, Second HTS4Fusion Conductor Workshop // Development of a 100-kA-class HTS conductor and its mechanical joint for the helical fusion reactor. — Villigen, Switzerland, 2014.
25. N. Bykovsky, R. Wesche, P. Bruzzone, D. Uglietti, Second HTS4Fusion Conductor Workshop // High current HTS conductor development at CRPP. — Villigen, Switzerland, 2014.
26. М.В. Ковальчук, Э.А. Азизов, В.В. Игнатъев, С.А. Субботин, В.Ф. Цибульский, Е.П. Велихов, Гибридный термоядерный реактор для производства ядерного горючего с минимальным радиоактивным загрязнением топливного цикла // Вопросы атомной науки и техники. Серия "Термоядерный синтез". — №37, — Выпуск 4. — 2014. — с. 5-10.
27. А.В. Спицын, Б.В. Кутеев, С.С. Ананьев, Топливный цикл термоядерного источника нейтронов // Вопросы атомной науки и техники. Серия "Термоядерный синтез". — №37, — Выпуск 4. — 2014. — с. 11-21.
28. Иванов Д.П., Анашкин И.О., Колбасов Б.Н., Сверхпроводниковая магнитная система для российского токамака - источника нейтронов ДЕМО-ТИН // Вопросы атомной науки и техники. Серия "Термоядерный синтез". — №37, — Выпуск 3. — 2014. — с. 5.
29. M. Eisterer HTS4Fusion Conductor Workshop // High fluence neutron irradiation of coated conductors. — Villigen, Switzerland, 2014.

30. С.В. Белогуров, А.Е. Петров, А.Н. Карпов, И.В. Кудреницкис, В.Н. Ковалев, Е.Н. Куркин, А.А. Маклецов, Ю.Г. Морозов, М.Д. Нерсесян, М.М. Брезгунов, Воздействие тепловых нейтронов на магнитные и структурные свойства $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ // *Сверхпроводимость: физика, химия, техника*. — №3, — Выпуск 5. — 1990. — с. 122-126.
31. Roberto Bonifetto, Umberto Bottero, Arnaud Foussat, Neil Mitchell, Kazutaka Seo, Roberto Zanino, Laura Savoldi Richard, Analysis of the Effects of the Nuclear Heat Load on the ITER TF Magnets Temperature Margin // *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*. — №24, — Выпуск 3. — June 2014. — с. 4200104.
32. Лопота В.А., Синявский В.В., Легостаев В.П., Перспективы и эффективность применения космических ядерно-энергетических установок и ядерных электроракетных двигательных установок // *Космическая техника и технологии*. — Выпуск 1. — 2013. — с. 4-15.
33. F.R. Chang-Diaz et. al., Electromagnetic ion cyclotron resonance heating in the VASIMR // *Advances in Space Research*. — Vol 42. — 2008. — с. 192-205.
34. A.J. Audette, W.E. Barton, M.D. Hilderbrand, J.K. Dietz et. al. Flow Cooling Of Superconducting Magnets For Spacecraft Applications // *Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference - CEC*. — Vol 53. — 2008. — с. 291-298.
35. Chris S. Olsen, Franklin R. Chang Díaz, Leonard D. Cassady, Benjamin W. Longmier, Maxwell G. Ballenger, Mark D. Carter, Tim W. Glover, Greg E. McCaskill, Jared P. Squire, The 32nd International Electric Propulsion Conference // *VASIMR® VX-200 Operation at 200 kW and Plume Measurements: Future Plans and an ISS EP Test Platform*. — Wiesbaden, Germany, 2011.
36. Е.Ю. Брагин, В.А. Жильцов, В.М. Кулыгин, С.В. Янченков, А.В. Березкин, Экспериментальные исследования плазменных потоков в открытой ловушке с тороидальным дивертором при ЭЦР-разряде // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*. — №37, — Выпуск 1. — 2014. — с. 47-55.

37. Радиационная и электромагнитная безопасность длительных и дальних космических полетов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Труханов К.А. Москва 2006.
38. Piero Spillantini, Superconducting magnets and mission strategies for protection from ionizing radiation in interplanetary manned missions and interplanetary habitats // *Acta Astronautica*. — Vol. 68. — 2011. — с. 1430-1439.
39. Valerio Calvelli, Stefania Farinon, Roberto Battiston, William J. Burger, Piero Spillantini, Riccardo Musenich, A Magnesium Diboride Superconducting Toroid for Astroparticle Shielding // *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, Vol. 24, No. 3, June 2014. — №24, — Vol. 3. — June 2014.
40. Joy Van Holle, Tim Haugan, Damir Latypov, EPRI 10th Conf. Superconductivity // *Investigating SMES Devices for Air and Space Applications*. — Tallahassee, Florida, 2011.
41. Timothy J. Haugan et. al., Design of SMES Devices for Air and Space Applications.
42. Naoki Hirano, Shigeo Nagaya, Hiroshi Kawashima, Kohei Higashikawa, Taketsune Nakamura, Koji Shikimachi, System Coordination of 2 GJ Class YBCO SMES for Power System Control // *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*. — №19, — Vol. 3. — June 2009.
43. M. Anerella, P. Joshi, J. Higgins, S. Lakshmi, W. Sampson, J. Schmalzle, P. Wanderer, R. Gupta, International Workshop on Coated Conductor for Applications 2014 // *High Field HTS SMES Coil*. — Jeju, Korea, 2014.
44. Xudong Wang, Atsushi Ishiyama, Tomonori Watanabe, Naoki Hirano, Shigeo Nagaya, Hiroshi Ueda, Yuta Masui, Experiment and Numerical Simulation on Quench Detection in Cryocooler-Cooled YBCO Coil for SMES Application // *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*. — №24, — Vol. 3. — June 2014.
45. D.C. van der Laan et. al., EPRI Superconductivity Conference Oct. 12th 2011, // RE-Ba₂Cu₃O_{7-d} coated conductor helical cables for electric power transmission and SMES. — Tallahassee, FL, 2011.

46. Michael Benedikt EuCARD-2 // Future Circular Collider (FCC) Study. — DESY, 2014.
47. Amalia Ballarino, IEEE/CSC & ESAS Superconductivity News Forum (global edition), October 2013 // Development of Superconducting Links for the LHC Machine, 2013.
48. B. Shu, B. Tian, Y. W. Sun, L. Z. Wang, Y. Q. Gao, L. Liu, Z. Q. Wei, L. F. Zhang, X. H. Zhu, Q. Li, H. Hong, J. B. Cao, W. Z. Gong, Y. Xin, J. B. Cui, Safety Considerations in the Design, Fabrication, Testing, and Operation of the DC Bias Coil of a Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — №23, — Vol. 3. — 2013.
49. W. Z. Gong, Y. W. Sun, J. B. Cui, H. Hong, X. Y. Niu, H. Z. Wang, L. Z. Wang, Q. Li, J. Y. Zhang, Z. Q. Wei, L. Liu, H. Yang, X. H. Zhu, Y. Xin, Factory and Field Tests of a 220 kV/300 MVA Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — №23, — Vol. 3. — 2013.
50. В.Е. Кейлин, В.И. Кочкин, М.П. Алексеев, и др., "Токоограничитель," патент 2254128, июнь 05, 2005.
51. A. Belov, V. Belyakov, T. Belyakova, V. Bondarenko, A. Firsov, A. Hon, M. Kaparkova, N. Krylova, V. Kukhtin, E. Lamzin, M. Larionov, A. Pugachev, I. Rodin, N. Shatil, S. Sychevskiy, V. Vasiliev, and E. Zapretilina, Computational Technique for Analysis of Superconductive Fault Current Limiters With Saturated Core // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — №3, — Vol. 24. — 2014.
52. D Alferov, A Budovsky, I Dul'kin, L Fisher, V Ivanov, V Sidorov, R Shul'ga, E Tshay and D Yevsin, Study of superconducting fault current limiter model with AC circuit-breaker // IEEE/CSC & ESAS EUROPEAN SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM (ESNF). — №11,— 2010.
53. D. F. Alferov, M. R. Akhmetgareev, A. I. Budovskii, R.A. Bunin, I. F. Voloshin, P.N. Degtyarenko, D.V. Yevsin, V.P. Ivanov, V.A. Sidorov, L. M. Fisher, E.V.

- Tshai, Superconducting dc current limiting vacuum circuit breaker // *Physics Procedia*. — №36,—2012.
54. Takashi Yazawa et. al., Coated Conductors Applications // Fault current limiter using coated conductors. — Houston, 2008.
55. D. Hazelton, J. Duval, M. Albertini, S. Repnoy, V. Selvamanickam, G. Majkic, I. Kesign, J. Langston, M. Steurer, F. Bogdan, J. Hauer, D. Crook, S. Ranner, T. Williams, M. Coleman, J. C. Llambes, Performance of 2G HTS Tapes in Sub-Cooled LN2 for Superconducting Fault Current Limiting Applications // *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*. — №21, — Vol. 3. — June 2011.
56. Andrej Kudymow, Stefan Fink, Wilfried Goldacker, Francesco Grilli, Christian Schacherer, Achim Hobl, Joachim Bock, Mathias Noe, Steffen Elschner, ENSYSTROB—Resistive Fault Current Limiter Based on Coated Conductors for Medium Voltage Application // *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, Vol. 21, NO. 3, June 2011.
57. B.-C. Park, Y.-T. Jeong, Y.-J. Kim, S.-E. Yang, W.-S. Kim, H.-R. Kim, H.-I. Du, S.-W. Yim, Improvement in operational characteristics of KEPCO's line-commutation-type superconducting hybrid fault current limiter // *Physica C* 484. — Выпуск 484. — 2013. — с. 267-271.
58. Marco Bocchi, Massimo Ascade, Angelo Valzasina, Valerio Rossi, Giuliano Angeli, Cesare Ravetta, Luciano Martini, Development, testing and installation of a Superconducting Fault Current Limiter for medium voltage distribution networks // *Physics Procedia*. — Vol. 36. — 2012. — с. 914-920.
59. X. Liu, J. Sheng, L. Cai, Z. Jin, J. Gu, Z. An, X. Yang, Z. Hong, Y. Chen, Design and Application of a Superconducting Fault Current Limiter in DC Systems // *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*. — №24, — Vol 3. — June 2014.
60. Уилсон М. Сверхпроводящие магниты. — 1985. — М.: Мир.
61. Минц Р.Г., Рахманов А.Л. Неустойчивости в сверхпроводниках. — 1984. — М.: Наука.

62. Yukikazu Iwasa, Joseph Jankowski, Seung-yong Hahn, Haigun Lee, Juan Bascuñán, Jodi Reeves, Allan Knoll, Yi-Yuan Xie, and Venkat Selvamanickam. Stability and Quench Protection of Coated YBCO “Composite” Tape. – 2005. – IEEE Trans. on Appl. Supercond. – V. 15. – I. 2.
63. V R Romanovskii and K Watanabe. Operating modes of high-T_c composite superconductors and thermal runaway conditions under current charging. – 2006. – Supercond. Sci. Technol. V. 19. – PP. 541–550.
64. V.S. Vysotsky, A.L. Rakhmanov and Yu. A. Ilyin. Novel Approaches To Describe Stability And Quench Of Hts Devices. – 2007. – Nova Science Publishers, Inc.. – PP. 221–237.
65. Романовский В.Р. Механизмы возникновения токовой неустойчивости в высокотемпературных сверхпроводниках, охлаждаемых жидким хладагентом. – 2009. – Журнал технической физики. – Т. 79. – В. 12 стр. 44–51.
66. V Romanovskii, K Watanabe and S Awaji. Current Instability of High Temperature Superconducting Tapes in the AC Modes. – 2014. – Journal of Physics: Conference Series. – I. 507.
67. Young Gun Park, Young Jin Hwang, Jae Young Jang, Hyung Jun Kim, Woo Seung Lee, Hyun Chul Jo, Ho Min Kim, Yong Soo Yoon and Tae Kuk Ko. Evaluation on Electrical and Thermal Characteristics of Multi-Stacked HTS Coated Conductor With Various Stabilizers. – 2014. – IEEE Transactions On Applied Superconductivity. – V. 24. – I. 3.
68. P.N. Degtyarenko, I.N. Dul'kin, L.M. Fisher, A.V. Kalinov, and I.F. Voloshin. Thermoelectric instability induced by a single pulse and alternating current in superconducting tapes of second generation. – 2011. – Fizika Nizkikh Temperatur, v. 37, No. 2, p. 127–133.
69. P. N. Degtyarenko, I.N. Dul'kin, L.M. Fisher, G. I. Garas'ko, A.V. Kalinov, S. B. Vavilov, I. F. Voloshin. Temperature rise of copper and HTSC tapes in liquid nitrogen by a step-wise current pulse. – 2012. – Physics Procedia 36 596 – 599.

70. A.L. Rakhmanov, S.S. Ivanov, N.N. Balashov, P.N. Degtyarenko. Local Overheating at Quenching of High Temperature Superconducting Tapes. – 2013. – прикладная физика и математика – №1.
71. S. S. Fetisov, V. S. Vysotsky, and V. V. Zubko. HTS Tapes Cooled by Liquid Nitrogen at Current Overloads. – 2011. – IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY. – Vol. 21. – №3.
72. V. Selvamanickam, Proc. Coated Cond. Appl. // Research activities in U.S. on coated conductors. — Heidelberg, Germany, 2012.
73. Фастовский и др. Криогенная техника. – 1974. – Энергия. – Москва.
74. Теплофизические свойства материалов при низких температурах под ред. Новицкий Л. А. Кожевников И. Г. 1975.
75. Danko van der Laan, L.F. Goodrich, M.W. Rupich, X.Y. Xie, A. Usoskin, H.C. Freyhardt, J. Fraser Douglas, Effect of strain on flux pinning in YBCO coated conductors — CCA09// Barcelona, Spain, 2009, November 23rd – c. poster session D1-P25.
76. Mike P. Staines, Zhenan Jiang, Nathan S. Allpress, Neil D. Glasson, Verification Testing for a 1 MVA 3-Phase Demonstration Transformer Using 2G-HTS Roebel Cable // IEEE Transactions On Applied Superconductivity. — №23, — Vol. 3. — 2013.
77. J.J.Gannon et. al. // IEEE Trans. on Appl. Superconductivity. — №23, — Выпуск 3. — June 2013.

**СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ
ДИССЕРТАЦИИ**

1. Study of HTS Coaxial Cable Models, IEEE. Trans. On Appl. Superconductivity Vol. 13 N2 June 2003 pp. 1934-1937, V.E. Keilin, V.E. Sytnikov, P.I. Dolgosheev, N.V. Polyakova, G.G. Slavov, I.I. Akimov, A.I. Boev, A.N. Ivanov, I.A. Kovalev, S.A. Lelehev, M.S. Novikov, S.I. Novikov, V.I. Shcherbarov
2. Конструкция и результаты испытаний макетного ВТСП ограничителя резистивного типа, Препринт ИАЭ-6634/10 Москва 2010, В.Е. Кейлин, В.В. Лобынцев, М.С. Новиков, С.И. Новиков, В.И. Щербаков
3. Design and Test Results of a 1MVA Resistive Type Fault Current Limiter, Physics Procedia 36 (2012) 1215 – 1218, Victor E. Keilin, Vladimir V. Lobyntsev, Mikhail S. Novikov, Stanislaw I. Novikov, Vladimir I. Shcherbakov
4. Investigation of Current Distribution in Multi-Tape HTS Samples, Physics Procedia 36 (2012) 1225 – 1230, V.E. Keilin, V.V. Lobyntsev, M.S. Novikov, S.I. Novikov, V.I. Shcherbakov
5. Исследование распределения токов в токонесущих ВТСП элементах, состоящих из нескольких проводников, материалы НКПС-2011 стр. 163-170, В.Е. Кейлин, В.В. Лобынцев, М.С. Новиков, С.И. Новиков, В.И. Щербаков
6. Preparation and Experimental Investigation of Heavy-Current Transposed HTS Conductors, Mikhail S. Novikov, Victor E. Keilin, Stanislav I. Novikov, IEEE Trans. On Appl. Superconductivity, Vol. 23, NO. 3, June 2013
7. Изготовление и экспериментальные исследования гибких геликоидальных высокоточных ВТСП токонесущих элементов, В.Е. Кейлин, М.С. Новиков, С.И. Новиков, Электричество, N1/2014, стр. 48-55

8. Геликоидальные сильноточные гибкие компактные токонесущие элементы из ВТСП лент 2-го поколения, материалы НКПС-2013, стр. 338-347, В.Е. Кейлин, М.С. Новиков, С.И. Новиков, С.А. Шуваев
9. Токонесущий элемент на основе ВТСП 2-го поколения для магнитной системы термоядерного источника нейтронов, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т.37, вып. 4, стр. 22-29, М.С. Новиков, Д.П. Иванов, С.И. Новиков, С.А. Шуваев
10. 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, М.С. Новиков, В.А. Жильцов, В.М. Кулыгин, С.И. Новиков

БЛАГОДАРНОСТИ

В заключение я выражаю глубокую благодарность инициатору и научному консультанту данной работы Виктору Ефимовичу Кейлину. Руководителю Отделения сверхпроводимости Виталию Сергеевичу Круглову и начальнику отдела сверхпроводниковых и криогенных устройств Михаилу Израелевичу Сурину за поддержку и содействие работе, ценные замечания и помощь в подготовке диссертации. Станиславу Иосифовичу Новикову за активную и конструктивную помощь и ценные идеи. Александру Петровичу Мягкову, Алексею Вячеславовичу Полякову и Сергею Алексеевичу Шуваеву за ценный вклад в разработку экспериментальных и численных методик исследований. Виктору Алексеевичу Шарыкину и Марине Николаевне Макаренко за большую помощь в редактировании, поддержку и внимание. Энглену Атакузиевичу Азизову за содействие и интерес к ВТСП в термоядерном синтезе, а Денису Петровичу Иванову за энтузиазм, идеи и содействие в этой области. Владимиру Михайловичу Кулыгину и Валерию Александровичу Жильцову за идеи, энтузиазм и большой труд в области плазменных межорбитальных буксиров. Коллективу компании «Русский сверхпроводник», особенно Виктору Ивановичу Панцырному и Дмитрию Алексеевичу Комаркову за финансирование ряда работ. Виктору Евгеньевичу Сытникову за ценные замечания. И всем сотрудникам Отделения сверхпроводимости за доброжелательное отношение и поддержку.