На правах рукописи

УДК 538.945, 536.581.3

Костров Евгений Александрович

КРИОМАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ВТСП И КРИОРЕФРИЖЕРАТОРОВ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва
2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН

Научный руководитель	**Демихов Евгений Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Демишев Сергей Васильевич**, доктор физико-математических наук, профессор **Успенская Людмила Сергеевна**, кандидат физико-математических наук
Ведущая организация	Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности, г. Москва

Защита состоится «29» ноября 2010 года в «12» часов на заседании ученого совета Д002.023.03 при учреждении Российской академии наук Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, Ленинский пр., д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения Российской академии наук Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, с авторефератом – на сайте института www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «___» октября 2010 г.
Отзывы на автореферат просим присылать по адресу:
119991 г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, Криогенный отдел

Ученый секретарь
Диссертационного совета д.ф.-м.н., Истомин Я. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сверхпроводящие магнитные системы (СМС) успешно используются в исследованиях по физике, химии, биологии, в ускорительной технике и электроэнергетике. До недавнего времени для создания СМС применялись низкотемпературные сверхпроводники на основе NbTi и Nb_3Sn. В данных системах достигнута предельная индукция магнитного поля 22 Тл при 4.2 К, обусловленная критическими свойствами сверхпроводников.

В последнее время разработана технология производства сверхпроводящих лент на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Уникальные характеристики ВТСП позволяют создавать СМС с индукцией магнитного поля выше 22 Тл при 4.2 К. ВТСП испытаны в магнитных полях с индукцией до 45 Тл, генерируемых с помощью несверхпроводящих магнитов. При этом токонесущая способность ВТСП при 4.2 К достаточна для создания СМС.

Несмотря на то, что первые ВТСП были синтезированы более 20 лет назад, длинномерные образцы ВТСП лент с улучшенными характеристиками (ВТСП 2-го поколения), наиболее подходящие для применения в СМС, стали доступны с 2006 года и к настоящему времени не достаточно хорошо изучены. Актуальной является задача создания различного рода устройств и приборов на основе ВТСП материалов для различных применений.

Работа криомагнитных систем во многом зависит от теплопритоков извне, что определяет экономичность работы криостатов. В большинстве криомагнитных систем основным источником испарения дорогостоящего жидкого гелия являются токовводы. Особенно проблема актуальна для крупных СМС, например ускорителей, где насчитывается тысячи токовводов. Применение ВТСП при создании токовводов позволяет значительно снизить расход жидкого гелия.

Важной частью СМС является криогенная система, от эффективности работы которой зависит работа СМС. В последнее время для получения рабочей температуры на уровне 4 К применяются криогенные рефрижераторы замкнутого цикла с холодопроизводительностью 1-1.5 Вт при 4 К, что позволяет обеспечить работу сверхпроводящих соленоидов без криогенных жидкостей. Учитывая низкую производительность криорефрижераторов, в большинстве криомагнитных систем используется дополнительный рефрижератор для охлаждения исследуемого образца, что приводит к удорожанию и увеличению габаритов экспериментальных установок. В связи с этим, вопрос создания методов одновременного обеспечения температурного режима сверхпроводящего соленоида и исследуемого образца с помощью одного рефрижератора является актуальным.

Целью работы было проведение экспериментального исследования долговременной стабильности и различных методик создания электрических контактов для ВТСП 2-го поколения. Разработка и исследование токовводов и соленоида на основе ВТСП 2го поколения. Создание и исследование криомагнитной системы на основе криорефрижератора замкнутого цикла и криогенного теплового ключа, обеспечивающей стабилизацию температуры исследуемого образца в интервале 6-300 К при индукции магнитного поля 7-8 Тл.

Научная новизна: В работе ВТСП 2-го поколения впервые успешно применены для улучшения параметров токовводов. Предварительно было проведено исследование различных методик создания электрических контактов между ВТСП второго поколения и металлом. Определены условия стабильности контактов. Экспериментально подтверждена стабильность критических свойств ВСТП 2-го поколения при длительной работе под токовой нагрузкой при 77 К.

Предложен метод расчета критических параметров ВТСП соленоида. Сложность расчета состоит в том, что критический ток ВТСП ленты зависит от угла между поверхностью ленты и вектором магнитного поля, причем характер зависимости критического тока от угла зависит от индукции магнитного поля.

Впервые метод слоевой намотки применен для создания ВТСП соленоида малого диаметра, что позволило увеличить плотность тока в соленоиде, тем самым повысить его рабочие характеристики.

Предложен и экспериментально исследован метод обеспечения температурного режима исследуемого образца и сверхпроводящего соленоида при помощи криогенного теплового ключа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Токовводы на основе ВТСП 2-го поколения для криомагнитных систем, охлаждаемые потоком газообразного гелия без дополнительного охлаждения жидким азотом. Величины теплопритоков к жидкому гелию для представленных токовводов находятся на уровне лучших мировых образцов, изготовленных на основе ВТСП 1-го поколения для большого адронного коллайдера.

2. Экспериментальные результаты исследования различных методик создания электрических контактов между ВТСП проводником второго поколения и металлом. Определены условия стабильности контактов. Найдено, что Толщина серебряного стабилизирующего слоя должна составлять не менее 1 мкм.

3. Результаты исследования долговременной стабильности ВТСП проводников второго поколения. Экспериментально подтверждена стабильность кри-

тических свойств ВСТП проводников после пропускания постоянного тока составляющего 70% от критического в течение 300 часов при 77 К.

4. Соленоид из ВТСП провода 2-го поколения. Применение метода слоевой намотки соленоида вместо широко используемой галетной технологии позволило значительно повысить плотность тока в обмотке, тем самым снизить расход проводника. Свойства ВТСП проводников 2-го поколения (значительные критические механические напряжения и высокая критическая плотность тока) позволяют использовать их для генерации магнитных полей с индукцией не менее 32 Тл при 4.2 К, что выше предельного значения для низкотемпературных сверхпроводников, составляющего 22 Тл для Nb_3Sn.

5. Предложен и реализован в среде Mathcad метод расчета критического тока ВТСП соленоида для магнитных полей с индукцией до 15 Тл.

6. Предложен и экспериментально исследован метод измерения физических величин в магнитном поле и широком интервале температур в криомагнитной системе на основе криорефрижератора замкнутого цикла, особенностью которой является применение криогенного теплового ключа. Криогенный теплового ключ позволил существенно упростить конструкцию системы и отказаться от использования дополнительного криорефрижератора для обеспечения температурного режима исследуемого образца.

Личный вклад автора заключается в обосновании выбора предложенных решений, математическом моделировании и изготовлении конструкторской документации для ВТСП токовводов, ВТСП соленоида и криомагнитной системы замкнутого цикла, подготовке и проведении экспериментов, анализе полученных данных и их интерпретации, составлении отчетной документации; подготовке материалов для публикаций и докладов на конференциях.

Апробация работы: Основные результаты диссертационной работы докладывались на 8 следующих конференциях: 2-я международная конференция “Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости” (Россия, Звенигород, 2006); 21-я Международная конференция по криогенной инженерии (ICEC21) (Чехия, Прага, 2006); Европейская конференция по прикладной сверхпроводимости (EUCAS 2007) (Бельгия, Брюссель, 2007); Научная сессия МИФИ-2008 (Россия, Москва, 2008), 22 Международная конференция по криогенной инженерии (ICEC22) (Корея, Сеул, 2008), 3-я международная конференция “Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости” (Россия, Звенигород, 2008); Европейская конференция по прикладной сверхпроводимости (EUCAS 2009) (Германия, Дрезден, 2009); 21 Международная конфе-

ренция по магнитным технологиям (MT-21), (Китай, Хефей, 2009).

Публикации: Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 печатных трудах, в том числе 2 статьи, 1 патент РФ, 8 публикаций в трудах конференций.

Структура и объем диссертации: Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, изложенных на 110 страницах, содержит 55 рисунков и 6 таблиц, 85 наименований в списке литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, формулируются цели и задачи исследований, приведена структура диссертационной работы.

В первой главе приведен краткий литературный обзор.

В первой части рассмотрены различные ВТСП материалы для создания СМС. Показано, что наиболее предпочтительными оказываются ВТСП 2-го поколения. Наилучшие представители ВТСП 1-го поколения значительно уступают по критическим механическим напряжениям. Круглые провода Bi2212 требуют термической обработки в среде O_2 чувствительной к температуре отжига.

Критический ток ВТСП ленты зависит от угла между направлением магнитного поля и поверхностью ленты, что должно быть учтено при расчете СМС.

Во второй части рассмотрена проблема оптимизации теплопритоков в СМС путем использования ВТСП токовводов. В большинстве криомагнитных систем с ними связан основной теплоприток к жидкому гелию. Известно [1], что теоретический минимальный теплоприток к нижнему концу несверхпроводящего токоввода в интервале температур 4.2-300 К составляет 1.04 Вт/кА при охлаждении парами испарившегося гелия. Применение ВТСП в токовводах позволяет в несколько раз снизить значение теплопритока [2, 3]. В большинстве работ описаны токовводы с дополнительным охлаждением ВТСП части потоком газообразного гелия с температурой 20К. Такой режим охлаждения реализуется в токовводах для большого адронного коллайдера. При этом для ВТСП токовводов, охлаждаемых исключительно парами испарившегося гелия [4] теплоприток к жидкому гелию оказался выше, чем для несверхпроводящих токовводов, что может быть связано с низкой токонесущей способностью ВТСП на момент проведения исследований. К моменту проведения настоящих исследований, данных о применении ВТСП 2-го поколения в токовводах не было.

В третьей части рассмотрены различные СМС на основе ВТСП. Несмотря на то, что критическая температура ВТСП выше температуры кипения жидкого азота, при 77 К токонесущая способность ВТСП недостаточна для создания

СМС с индукцией магнитного поля выше 2 Тл. Однако при температуре кипения жидкого гелия ВТСП материалы имеют ряд преимуществ по сравнению с низкотемпературными сверхпроводниками (НТСП) на основе NbTi и Nb_3Sn. Рекордное магнитное поле полученное с помощью НТСП соленоида составляет 22 Тл при 4.2 К. К настоящему времени ВТСП испытаны в магнитных полях с индукцией до 45 Тл, генерируемых с помощью несверхпроводящих магнитов. При этом токонесущая способность ВТСП при 4.2 К достаточна для создания СМС. Кроме того, критические механические напряжения для ВТСП 2-го поколения значительно выше, чем для низкотемпературных сверхпроводников.

Учитывая высокую стоимость ВТСП, во всех работах ВТСП соленоиды используются в качестве внутренней секции несверхпроводящего магнита или соленоида на основе НТСП для повышения индукции магнитного поля.

В четвертой части описан принцип работы криогенного рефрижератора на цикле “Пульсационная труба”.

В пятой части дан обзор СМС на основе криорефрижераторов замкнутого цикла. Для охлаждения сверхпроводящих магнитов до 4 К применяются криогенные рефрижераторы, работающие на циклах Гиффорда – Макмагона и “пульсационной трубы” (ПТ) [5]. В большинстве СМС магнитное поле создается в отверстии, имеющем комнатную температуру. Для исследований при пониженных температурах используется второй криорефрижератор. Системы на основе одного криорефрижератора производятся компанией Cryogenics Limited (Великобритания) [6] с 2006 года. Кроме конечных результатов, других данных, касающихся конструкции или технологии изготовления системы не публикуется. Минимальная температура для используемого криорефрижератора составляет 2,7 К. Достижение минимальной температуры вставки 1,6 К и дополнительный резервуар с газообразным гелием позволяют предположить принцип работы системы. Газообразный гелий из резервуара ожижается при помощи криорефрижератора, затем используется для охлаждения вставки. Однако в данном случае время работы при температуре ниже 4,2 К должно быть конечно (пока не закончится жидкий гелий). Данные о времени поддержания 1,6 К на вставке не сообщаются. Кроме того, для ожижения гелия требуется дополнительное время, в связи с чем время выхода на рабочий режим составляет 24 часа.

В шестой части рассмотрены криогенные тепловые ключи. Наиболее перспективными для применения в диапазоне 6 – 300 К являются тепловые ключи с зазором, заполняемым теплообменным газом. Преимуществом данных тепловых ключей является отсутствие подвижных частей, возможность работы в магнит-

ном поле и простота конструкции. Тепловой ключ состоит из двух коаксиальных медных цилиндров, заключенных в в кожух из нержавеющей стали. Теплопроводность ключа изменяется при заполнении или вакуумировании пространства между медными цилиндрам теплообменным газом (гелий, водород, неон). Хотя данный тип тепловых ключей предложен еще в 1973 г [7], данных о его применении в криомагнитных системах для одновременного обеспечения температурного режима исследуемого образца и сверхпроводящего соленоида нет.

Во второй главе в первой части приведены экспериментальные результаты по исследованию различных методик создания электрических контактов между ВТСП 2-го поколения и металлом. К моменту начала исследований (2006 г) производителями ВТСП не давалось практических рекомендаций по технологии создания контактов. Более того, различные методики создания контактов исследуются по сей день [8,9].

Исследован ВТСП 2-го поколения на основе DyBCO, производства THEVA (Германия), сечением 4х0,1 мм2. Структура ВТСП ленты THEVA нанесена на подложку из никелевого сплава Hastelloy C276 (Рис.1).

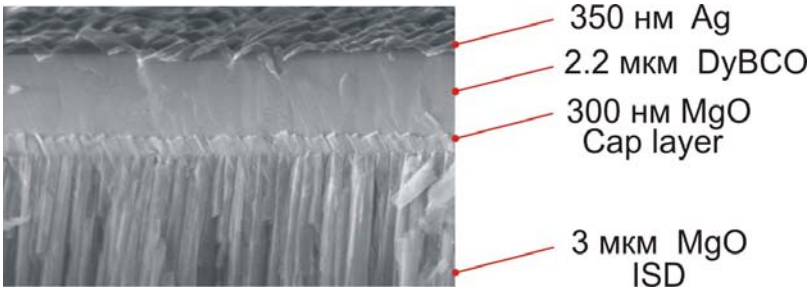

Рис.1. Поперечное сечение ВТСП THEVA.

Для практического применения ленты, необходимо было разработать технологию пайки ВТСП лент между собой и с нормальным металлом. При использовании припоев Sn60Pb40, Sn40Pb60 наблюдалось растворение серебряного слоя в припое. При применении специализированного припоя In96Ag4, полного растворения серебра в припое избежать не удалось.

Растворение серебряного слоя отсутствовало при использовании припоя Sn62PbAg2, при температуре жала паяльника не выше 200 ºС. Однако после пайки наблюдалось отслоение серебряного слоя от ВТСП под действием термомеханических напряжений при охлаждении до 77 К (рис.2).

Рис.2. Отслоение серебряного слоя ВТСП THEVA

Растворение поверхностного слоя отсутствовало также при использовании сплава Вуда, но соединение не выдерживало многократного термоциклирования (см. 3). Для исследования контактного сопротивления при использовании различных припоев и флюсов, исследуемый образец припаивался клеммам вторичной обмотки трансформатора, при этом схема включения по сути представляла собой резистивный токоограничитель, предотвращающий повреждение ВТСП ленты случае её перехода в нормальное состояние.

Снято несколько вольт – амперных характеристик ВТСП лент различающихся технологией пайки (различные флюсы, температуры жала паяльника). На рис.3 приведена одна из таких характеристик.

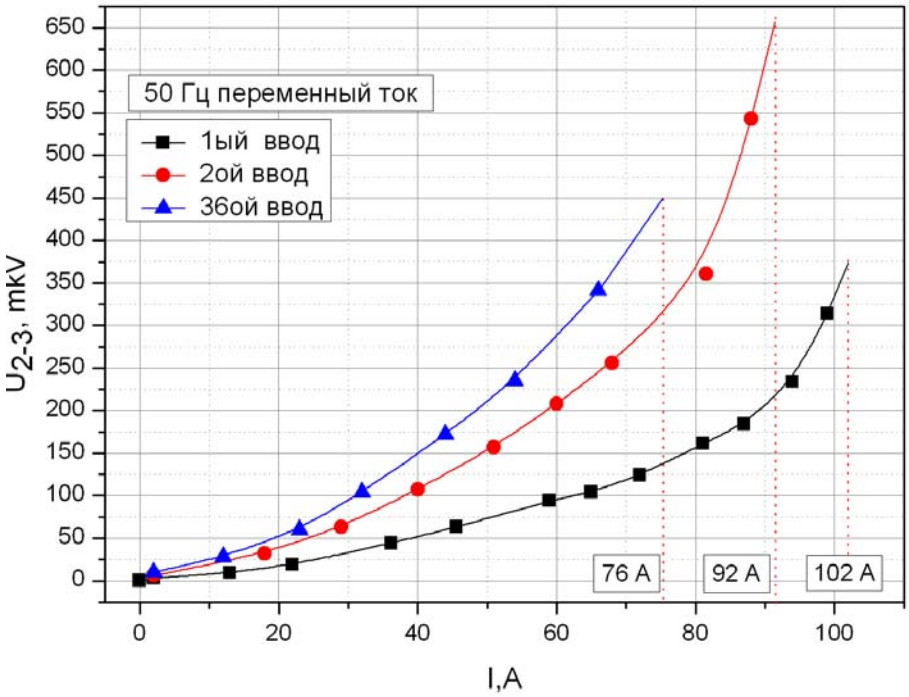

рис.3. Зависимость напряжения на контактах от тока

В эксперименте использовалась ВТСП лента THEVA сечением 0,1x10 мм^2. При термоциклировании наблюдалось снижение тока перехода в несверхпроводящее состояние, связанное с деградацией паянного соединения.

Также исследовались свойства прижимных электрических контактов с промежуточным слоем индия. Экспериментально измеренное контактное сопротивление при 77 К составило 2.2 мкОм*см^2.

Полученные результаты показали, что исследуемая ВТСП лента производства THEVA в существующем виде малопригодна для использования в токовводах. Для дальнейших исследований использовалась ВТСП лента с увеличенной толщиной серебряного слоя (1,5 мкм), для которой удалось осуществить пайку к медной шине при помощи In96Ag4 припоя. Соединение было устойчиво к многократному (более 30) термоциклированию 300-77-300 К. Характерное контактное электрическое сопротивление составило 1 мкОм*см^2 при 77 К.

Вторым объектом исследования был ВТСП 2-го поколения SCS4050 на основе YBCO, производства SuperPower (США), сечением 4x0.1 мм^2. Структура ВТСП ленты представлена на рис. 4.

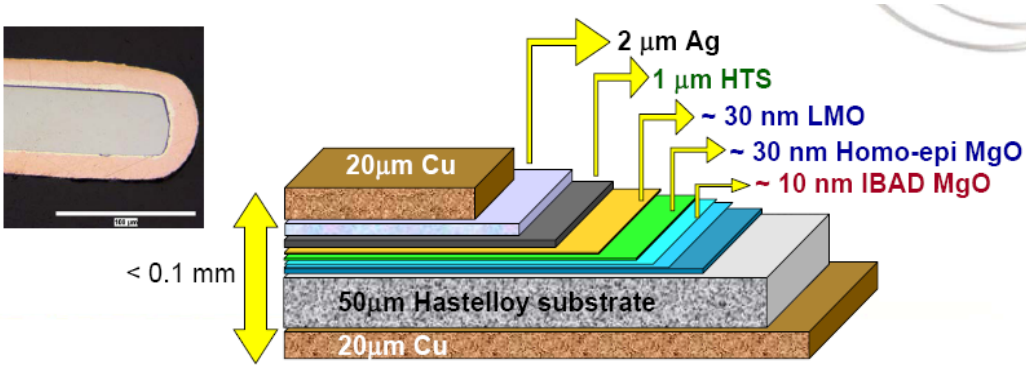

рис.4. Структура ВТСП ленты SCS4050

Следует отметить, что провод SCS 4050 герметично покрыт медным слоем толщиной 20 мкм, поэтому процесс пайки не вызвал затруднений и был осуществлен стандартным припоем ПОС-61. Характерное контактное сопротивление составило 40 нОм*см^2 при 77 К.

Во второй части приведены результаты исследования долговременной стабильности ВТСП 2-го поколения. Целью исследований являлось изучение стабильности критических свойств (Tc и Ic) ВТСП 2-го поколения после длительного пропускания транспортного тока 0.7 Ic при 77К в изотермических условиях (без термоциклирования). Серия опытов проведена на образцах сверхпроводящей ленты производства компании THEVA и SuperPower, сечением 4x0,1 мм^2. Необходимость исследований была обусловлена наличием литературных данных о деградации критического тока в тонких пленках ВТСП при длительном

пропускании тока [10]. Для предотвращения возможной деградации свойств ВТСП проводника в процессе пайки, использовались прижимные токовые и потенциальные контакты с промежуточным слоем индия.

Вольт-амперные характеристики ВТСП, полученные в различные периоды времени, представлены на рис.5 и рис.6.

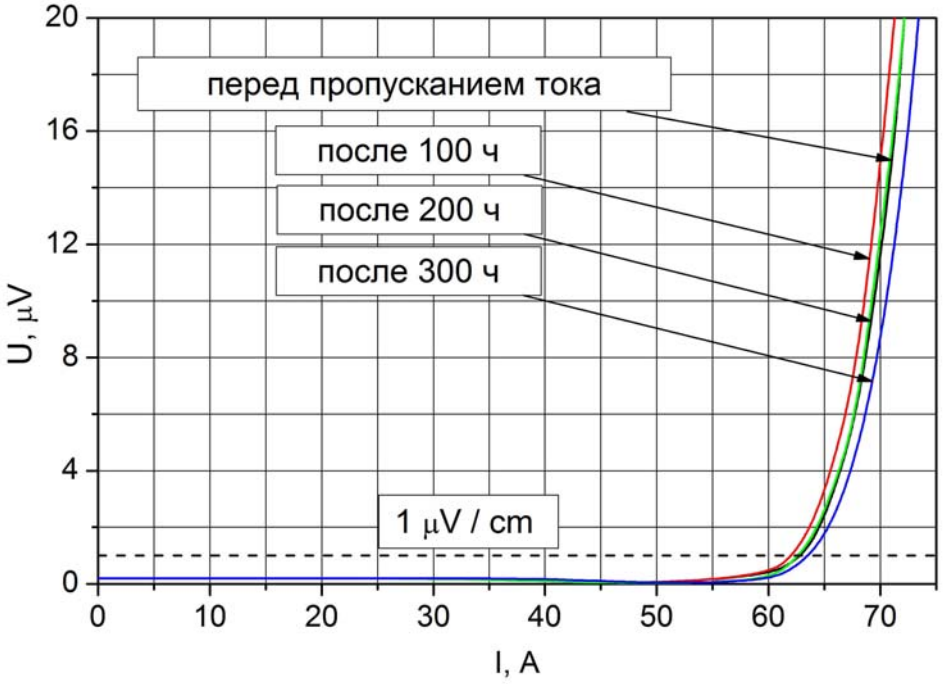

Рис.5. Вольт-амперные характеристики ВТСП THEVA.

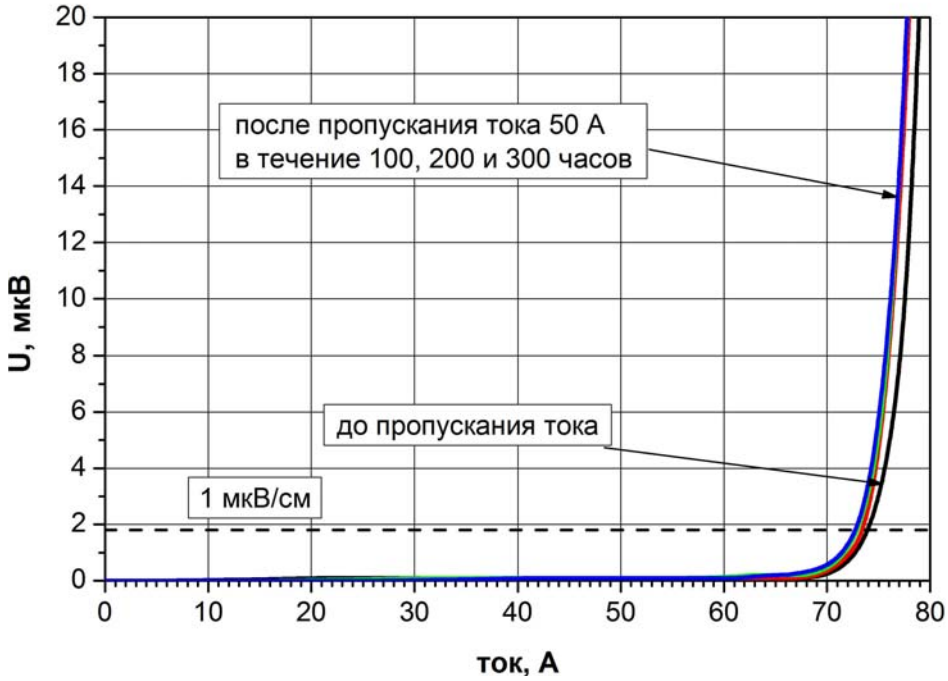

Рис.6. Вольт-амперные характеристики ВТСП SuperPower.

ВТСП THEVA имел критические параметры Tc = 90 К и Ic= 63 А (при 77 К) и размеры 108x4x0,1 мм^3. ВТСП SuperPower имел критические параметры Tc = 92 К и Ic= 72 А (при 77 К) и размеры 110x4x0,1 мм^3. Через образцы пропускался транспортный ток 43 ± 1 А и 50 ± 1 А соответственно.

В проведенных экспериментах продемонстрирована высокая стабильность параметров ВТСП лент второго поколения при пропускании постоянного тока 0,7 Ic в изотермических условиях при T=77К.

В третьей главе отражены вопросы разработки и испытания токовводов.

В первых трех частях главы представлены общее описание токовводов, методика расчета и методика испытания. Были изготовлены и испытаны две пары токовводов на основе ВТСП производства SuperPower и Theva. Основные принципы построения в обеих конструкциях одинаковы. Токовводы рассчитаны на использование их при токах до 200 А, охлаждаемые потоком газообразного гелия, без дополнительного охлаждения жидким азотом. Токовводы состоят из трех секций (нормальной, смешанной и ВТСП), которые механически и электрически связаны между собой.

В четвертой части приведен расчет и результаты испытания токовводов на основе ВТСП SuperPower. Конструкция токовводов представлена на рис.7.

Рис.7. Конструкция 200 А токоввода.

Механическая основа представляет собой трубку из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, для улучшения теплоотдачи от токоввода к охлаждающему газу используется поперечное оребрение в виде медных колец. Нормальная часть представляет собой 4 латунных полоски, впаянных в прорези медных колец мягким припоем. В смешанной части, верхняя точка которой имеет температуру 90 К, на латунные полоски дополнительно припаиваются 4 ВТСП проводника 2-го поко-ле-ния. Нижняя точка смешанной части имеет температуру 40 К, в этом месте она пе-реходит в ВТСП часть, где сверхпроводящие ленты впаиваются в прорези

медных колец без использования латунных шунтов, что позволяет снизить теплоприток за счет теплопроводности по твердому телу.

Фотография токовводов представлена на рис. 8. Основные расчетные параметры токоввода представлены в Таблице 1.

Рис.8. Токовводы на основе ВТСП провода SuperPower.

Интервал температур (К) / секция	Материал	Теплопроводность (Вт/м*К)	Сечение ($мм^2$)	Длина (м)
300-90 / (нормальная1)	Латунь + Ст.12Х18Н10Т	57.0	52.0	0,22
90-40 /(смешанная)	Латунь + ВТСП + Ст.12Х18Н10Т	39.5	52.8	0,08
40-4.2 /(ВТСП)	Ст.12Х18Н10Т + ВТСП	27.5	22.8	0,12

Таблица 1. Основные расчетные параметры токоввода

Токовводы были испытаны в транспортом сосуде с жидким гелием. Начальная испаряемость жидкого гелия из транспортного сосуда соответствовала теплопритоку в 180 мВт. После размещения вставки с токовводами теплоприток к жидкому гелию возрос до 280 мВт, что соответствует дополнительному теплоритоку связанному с токовводами в 50 мВт на каждый токоввод при нулевом то-

ке. Зависимость теплопритока к жидкому гелию от транспортного тока приведена на рис. 9.

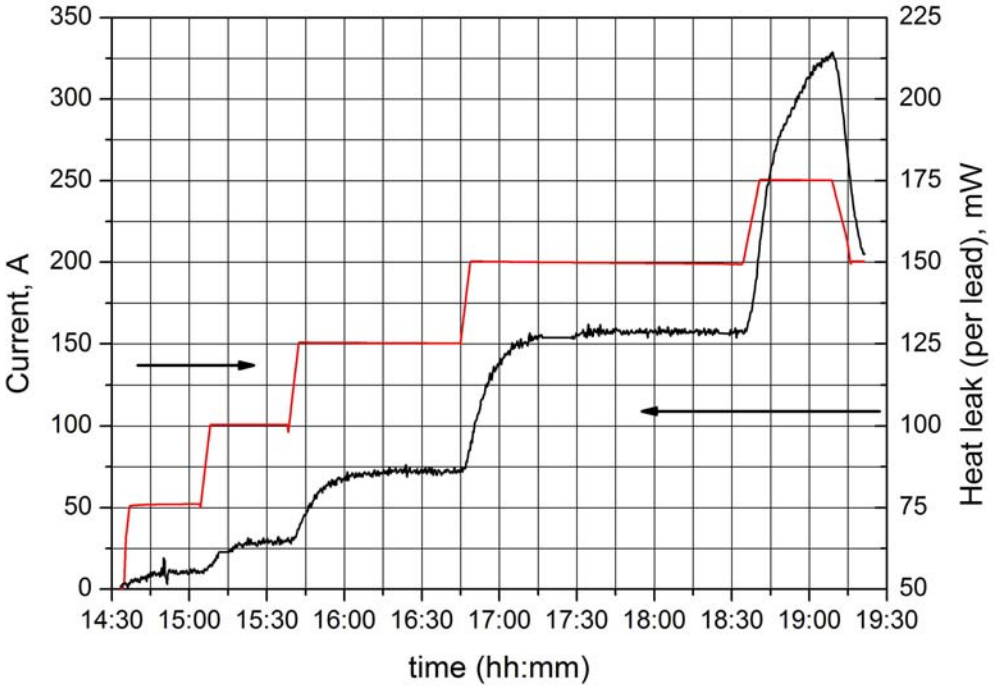

Рис.9. Зависимость теплопритока к жидкому гелию от транспортного тока.

Эксперимент подтвердил работоспособность токовводов в течение длительного времени при расчетном токе, и при кратковременной работе (порядка 40 мин) при токах выше расчетного. Дополнительный теплоприток к жидкому гелию, составил 127 мВт в расчете на один токоввод при 200 А, что примерно в 1,7 раза меньше теоретически минимально возможного теплопритока для несверхпроводящих токовводов. Конструкция токовводов позволяет увеличить токонесущую способность до 1000 А при помощи увеличения числа ВТСП лент и увеличения сечения несверхпроводящих частей.

В пятой части описаны токовводы на основе ВТСП THEVA.

В токовводах используются два ВТСП сечением 10x0.1 мм^2 с критическим током 150 А (при 77К, 0 Т) без дополнительного стабилизационного слоя.

Конструкция токовводов схожа с конструкцией токовводов на основе провода SuperPower, за исключением нескольких отличий. 1) Механическая основа выполнена в виде 4х стержней из нержавеющей стали. 2) Из-за технической сложности пайки ВТСП ленты THEVA с массивным медным или латунным проводником, в смешанной части токовводов используется прижимной контакт ВТСП лент с несверхпроводящей частью. ВТСП лента прижимается к латунной шине гальванически покрытой золотом при помощи тефлоновых колец, которые

благодаря более высокому коэффициенту теплового расширения (в сравнении с латунью и нержавеющей сталью), сжимаясь при охлаждении, обеспечивают электрический контакт.

Основные расчетные параметры токоввода представлены в Таблице 5.

Интервал Температур (К)/секция	Материал	Теплопро-водность (Вт/м*К)	Сечение ($мм^2$)	Длина (м)
300-90/ (нормальная|)	Латунь + Ст.12Х18Н10Т	66.9	42.6	0,271
90-40 / (сме-шанная)	Латунь + ВТСП + Ст.12Х18Н10Т	38.2	44.6	0,139
40-4.2 /(ВТСП)	Ст.12Х18Н10Т + ВТСП	2.3	14.6	0,09

Таблица 5. Основные расчетные параметры токоввода

Фотография ВТСП токовводов представлена на рис.10.

Рис.10. Фотография токовводов на основе ВТСП ленты THEVA.

На рис. 11 приведена зависимость теплопритока к жидкому гелию от транспортного тока.

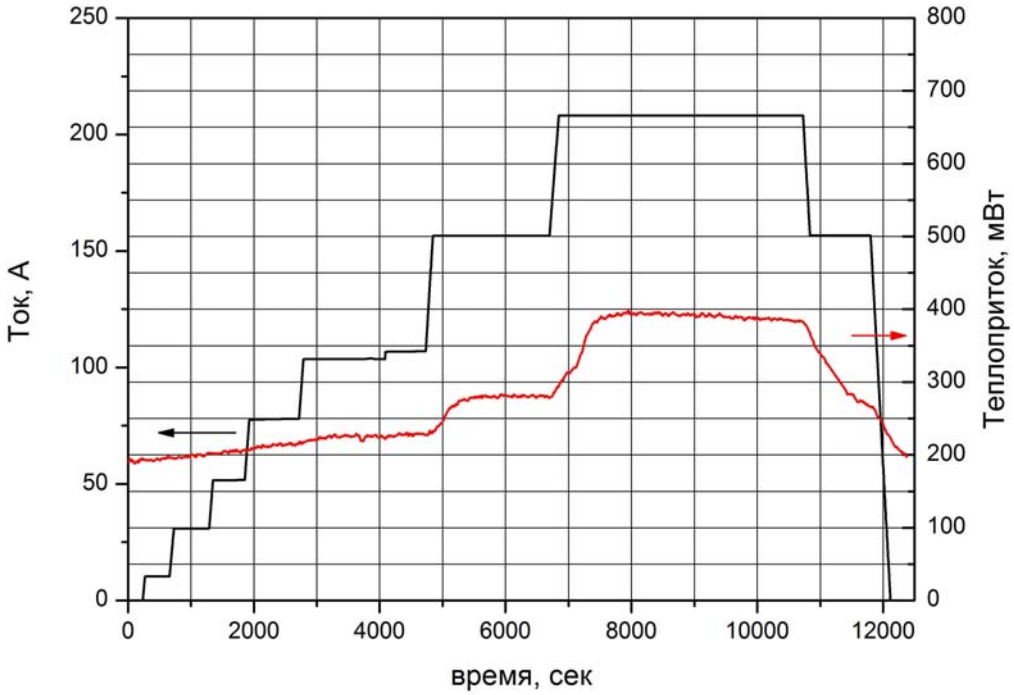

Рис.11. Результаты испытания ВТСП токовводов.

Дополнительный теплоприток к жидкому гелию, связанный с токовводами составил 93 мВт в расчете на один токоввод при 200 А (на графике показан полный теплоприток жидкому гелию, включающий в себя фоновое парение гелиевого сосуда равное 170 мВт), что примерно в 2,3 раза меньше теоретически минимально возможного теплопритока для несверхпроводящих токовводов. Токоввод был испытан кратковременно (порядка 5 мин) при токах до 400А. При этом ВТСП часть токоввода оставалась в сверхпроводящем состоянии. Данный факт свидетельствует о возможности увеличения рабочего тока до 400 А при увеличении сечения несверхпроводящих частей.

Эксперименты подтвердили, что обе пары токовводов устойчивы к термоциклированию и длительной работе при расчетном токе.

В случае использования ВТСП токовводов, теплоприток к жидкому гелию обратно пропорционален длине ВТСП секции токовводов. Относительные теплопритоки к жидкому гелию составляют 76.2 и 45.1 мВт*м / кА. В различных конструкциях ВТСП токовводов для большого адронного коллайдера относительные теплопритоки к жидкому гелию составляют 47 - 221 мВт*м / кА [11] Таким образом, параметры созданных токовводов находятся на уровне лучших мировых стандартов, созданных с использованием ВТСП 1го поколения.

В четвертой главе в первой части приведена методика расчета соленоида.

Во второй части приведены основные расчетные параметры и результаты испытания соленоида изготовленного из ВТСП 2-го поколения производства SuperPower (см. рис.12). Соленоид был импрегнирован клеем “Криосил” на основе эпоксидной смолы.

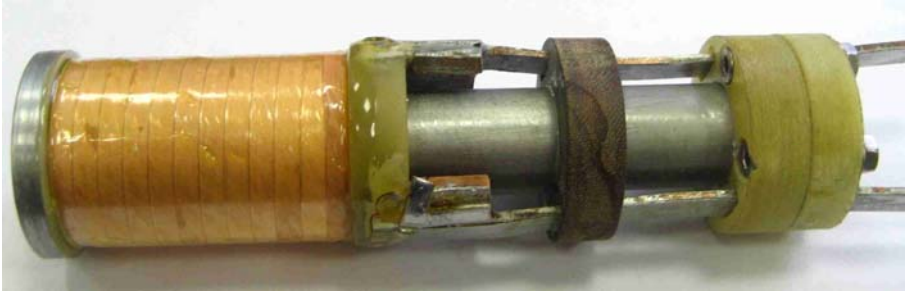

Рис.12. Фотография ВТСП соленоида.

Сложность расчета ВТСП соленоида состоит в том, что критический ток ВТСП ленты зависит от угла между поверхностью ленты и вектором магнитного поля, причем характер зависимости критического тока от угла зависит от индукции магнитного поля. Расчет индукции магнитного поля в обмотке ВТСП соленоида был проведен по методике [1]. Для этого в среде Mathcad была написана программа выдающая матрицы коэффициента индукции магнитного поля и угла к поверхности ленты с заданным шагом по радиусу и осевому направлению. Далее в заданных точках определялось значение критической плотности тока. Зависимость критической плотности тока ВТСП ленты от индукции магнитного поля (0-15 Тл) для углов 0, 45, 67.5 и 90 градусов между нормалью к поверхности ленты и вектором магнитного поля была взята из работы [12], промежуточные значения были получены методом билинейной интерполяции. Для определения критического тока соленоида были взяты интегралы критической плотности тока по сечению ВТСП ленты для каждого витка. Минимальное значение критического тока (определяемого по критерию 1 мкВ / см) составило 431 А для витков, находящихся вблизи верхнего и нижнего фланцев соленоида.

Большинство ВТСП соленоидов изготавливается по галетной технологии. В разработанном соленоиде применена технология слоевой намотки, которая позволяет значительно упростить процесс намотки. Соленоид намотан из одного куска провода, что избавляет от необходимости создания низкоомных контактов между галетами, что само по себе является довольно сложным процессом. Вторым несомненным преимуществом данной технологии является компактность соленоида, что является ключевым параметром при использовании его в качест-

ве внутренней вставки в сверхпроводящий соленоид на основе НТСП. К недостаткам технологии необходимо отнести невозможность внести изменения в уже изготовленный соленоид, что возможно в галетной технологии, где соленоид может быть разобран на отдельные галеты, секция с наихудшими параметрами изготовлена заново или перемещена в область низкого магнитного поля.

Основные параметры соленоида приведены в Таблице 3:

Диаметр отверстия	19.6 мм
Внешний диаметр магнита	38 мм
Внешний диаметр обмотки	34 мм
Высота обмотки	50 мм
Использовано провода (SCS4050)	37 м
Число витков	358

Таблица 3. Основные параметры ВТСП соленоида.

Изготовленный модельный магнит способен генерировать магнитное поле с индукцией до 0.29 Т при 77 К. Результаты испытания соленоида при 4.2 К представлены на рис. 13.

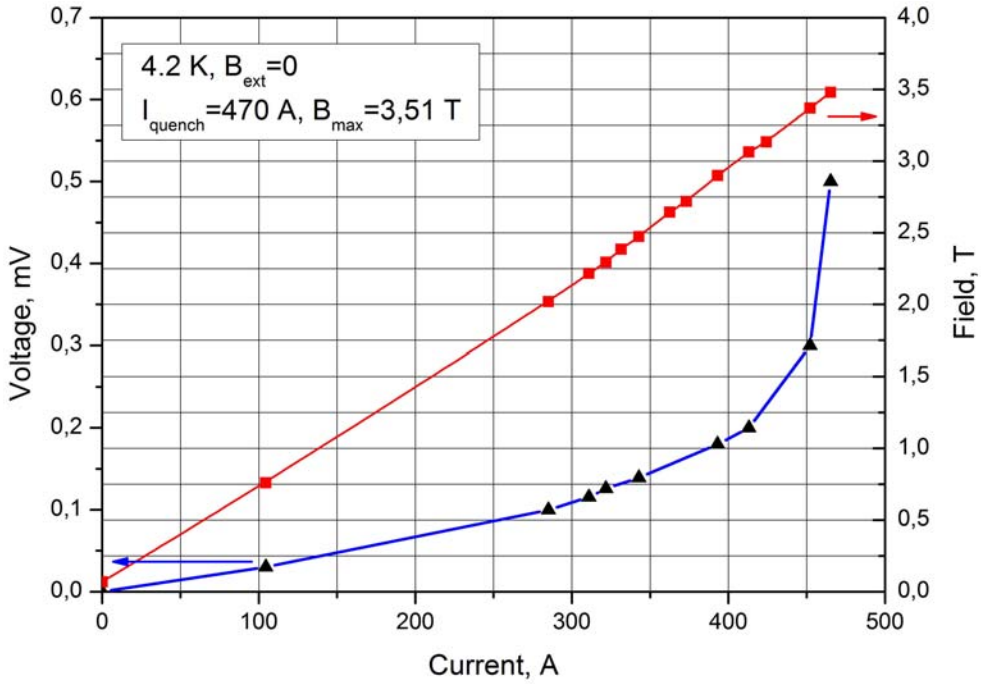

Рис.13. Результаты испытания ВТСП соленоида при 4.2 К.

Ток перехода ВТСП соленоида в несверхпроводящее состояние при 4.2 К равен 470 А, при этом индукция магнитного поля в центре соленоида составляет 3.51 Тесла.

Данное магнитное поле легко достижимо с помощью более дешевого NbTi провода, поэтому наиболее перспективным является использование ВТСП соленоида не как отдельного изделия, а в качестве внутренней секции соленоида на основе NbTi или Nb_3Sn.

В третьей части главы приведены результаты испытания ВТСП соленоида внутри СМС на основе NbTi. Основные параметры СМС приведены в таблице 4:

Коэффициент соленоида	37,3 мТл/А
Внутренний диаметр обмотки	52 мм
Внешний диаметр обмотки	144 мм
Высота обмотки	160 мм
Диаметр рабочего отверстия	45 мм
Максимальное магнитное поле	8,5 Тл

Таблица 4. Основные параметры СМС на основе NbTi

Зависимости от времени поля в центре, тока в NbTi соленоиде и тока в ВТСП соленоиде приведены на Рис.14.

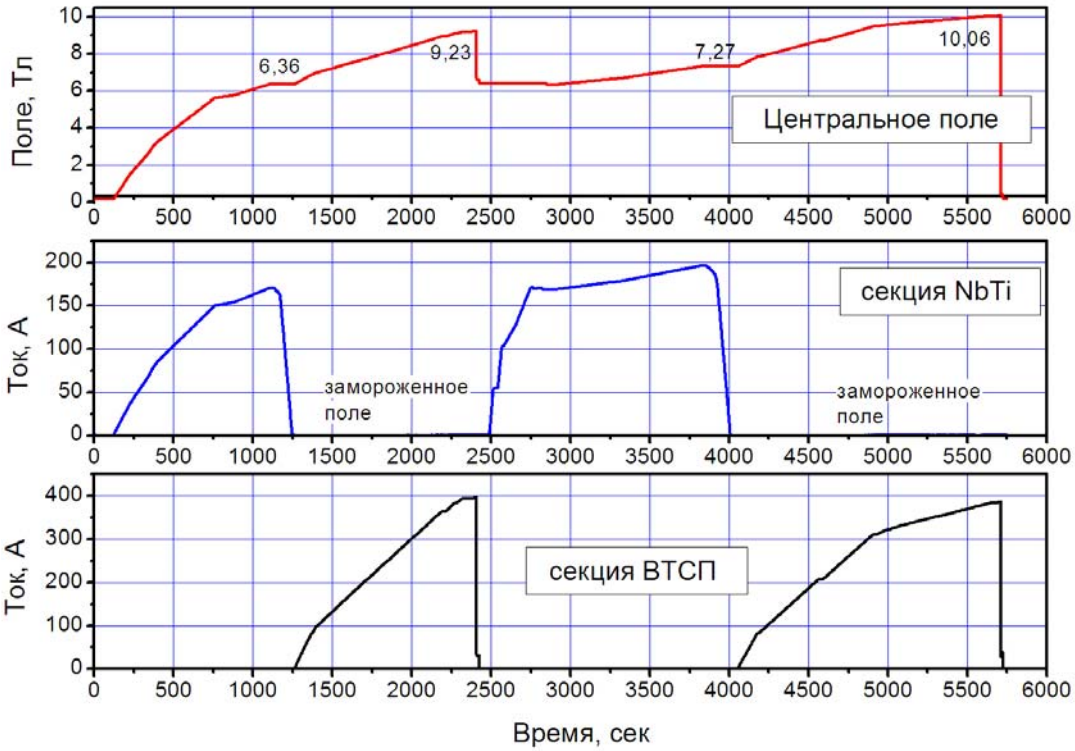

Рис.14 Результаты испытания ВТСП соленоида внутри СМС

Во внешнюю NbTi секцию вводился ток 170,4 А, при этом внешний соленоид генерировал магнитное поле 6,36 Тл. Затем сверхпроводящий ключ из NbTi переводился в сверхпроводящее состояние и внешняя секция работала в режиме замороженного поля. Во внутреннюю ВТСП секцию ток вводился до перехода в нормальное состояние. Ток перехода составил 394 А, суммарное магнитное поле составило 9,23 Тл. После этого ток внешней секции был увеличен до 196,4 А, при этом NbTi соленоид генерировал поле 7,27 Тл. Во внутреннюю ВТСП секцию ток вводился до перехода в нормальное состояние. Ток перехода составил 384А, суммарное магнитное поле, генерируемое гибридным магнитом, составило 10,06 Тл. Разработанная технология может быть использована для создания гибридных сверхпроводящих магнитов (NbTi+Nb_3Sn+ВТСП) с магнитным полем более 20 Тл.

Использование ВТСП вставок является единственным способом достижения магнитных полей с индукцией выше 22 Тл при 4.2 К в магнитных системах на основе сверхпроводников.

В пятой главе описана сверхпроводящая магнитная система с использованием криорефрижератора замкнутого цикла.

В первой части главы описана методика расчета криомагнитной системы.

Во второй части дано детальное описание конструкции криостата. Отличительной особенностью представленной магнитной системы является использование одного криорефрижератора для охлаждения сверхпроводящего магнита и вставки с переменной температурой (5.5 -300 К), что достигается применением теплового ключа в хладопроводе, соединяющем 2-ю ступень криорефрижератора и вставку с переменной температурой. Сверхпроводящий соленоид намотан на медный каркас для улучшения охлаждения за счет теплопроводности. Схема криомагнитной системы представлена на рис. 15.

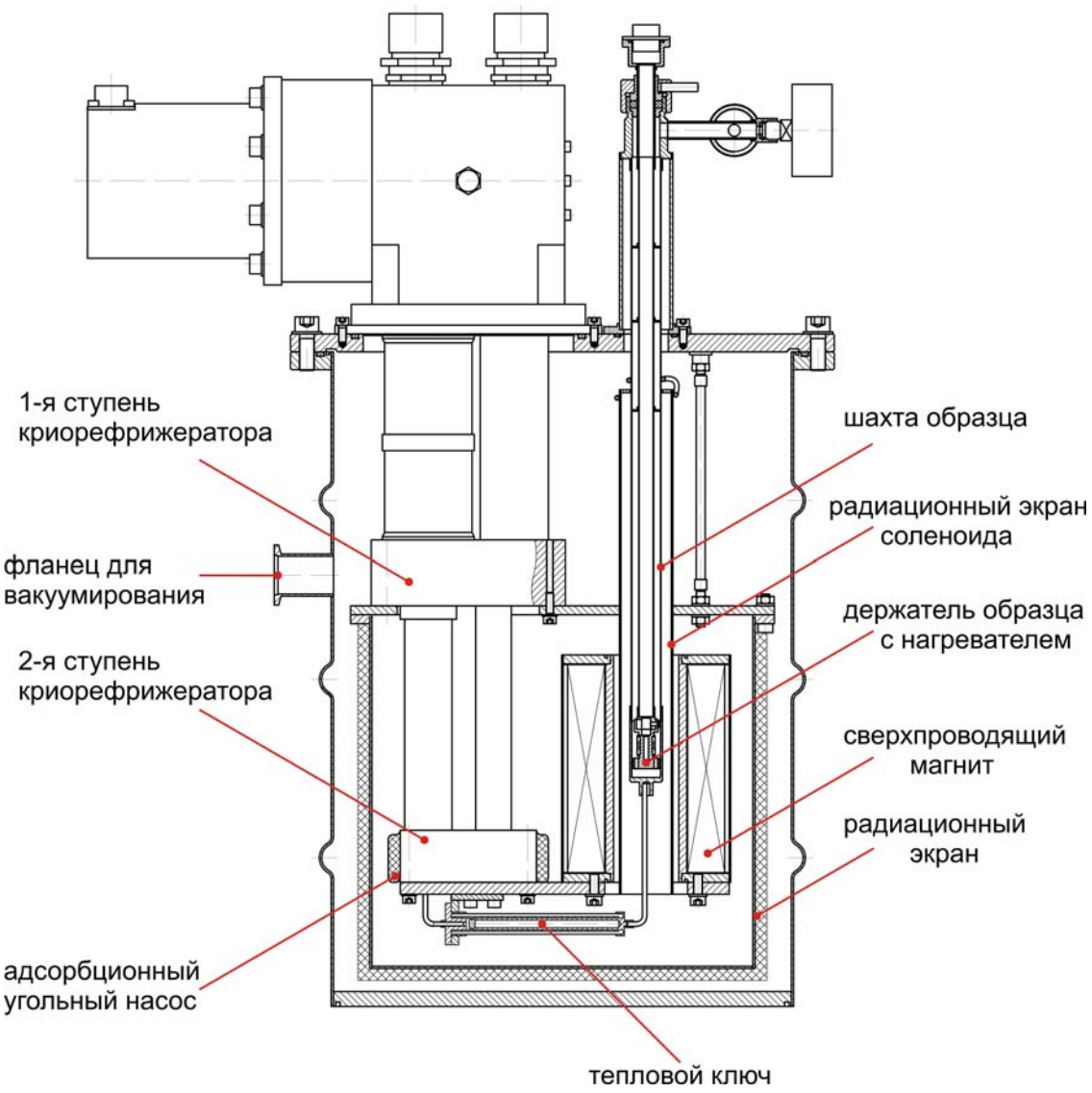

Рис. 15. Схема криомагнитной системы

Для снижения теплопритока излучением от вакуумного кожуха криостата к сверхпроводящему магниту и второй ступени криорефрижератора используется медный тепловой экран, охлаждаемый 1-ой ступенью криорефрижератора до 40 К. Дополнительный тепловой экран, размещенный во внутреннем пространстве соленоида служит для снижения перегрева магнита при высоких (>50K) температурах исследуемого образца.

Диаметр вставки с держателем образца – 20 мм. На вставке смонтирован резистивный нагреватель, который совместно с ПИД температурным регулятором используется для поддержания постоянной температуры в интервале 5.5 – 300 К.

На рис. 16 представлена фотография криостата с габаритными размерами, на и внутреннее устройство криостата (медный экран снят).

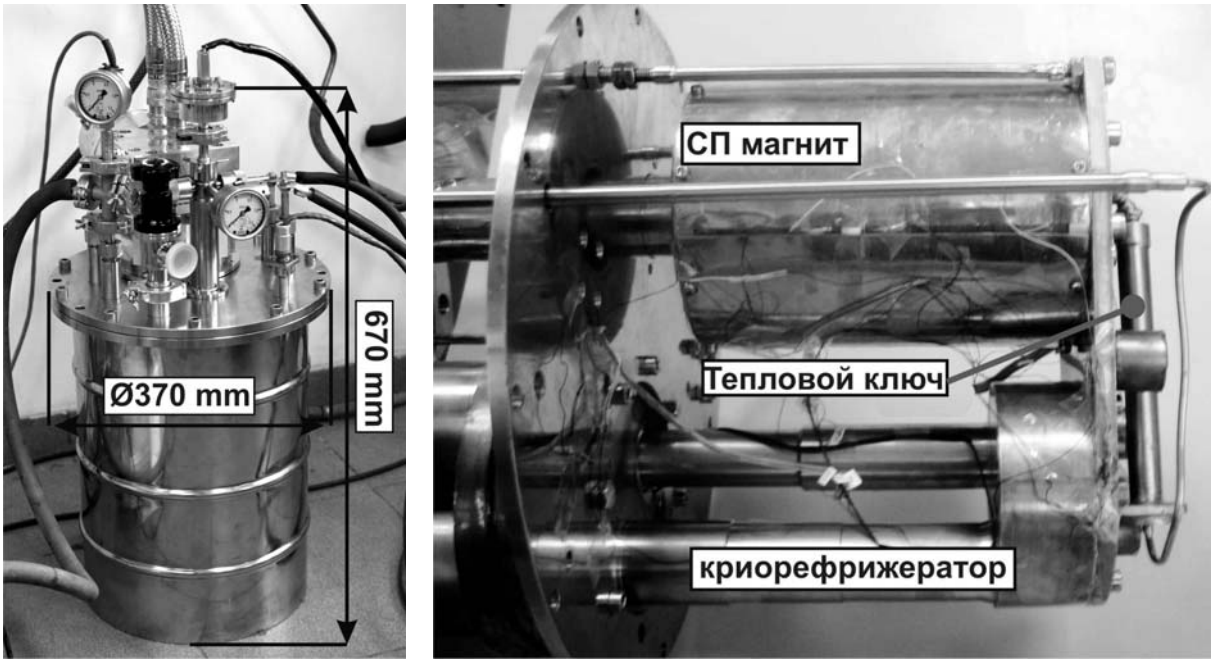

Рис.16. Фотография криомагнитной системы

Токовводы для питания соленоида состоят из 2-х частей. Первая, несверхпроводящая часть изготовлена из латуни. Нижняя часть латунных токовводов имеет тепловую связь с первой ступенью криорефрижератора, в этом к ней припаяны ВТСП ленты второго поколения SCS4050. Нижняя часть ВТСП лент имеет тепловую связь со второй ступенью криорефрижератора, где к ней припаивается сверхпроводящий провод на основе NbTi, из которого изготовлен соленоид.

Для улучшения вакуума на второй ступени криорефрижератора размещен угольный адсорбционный насос.

В третьей части главы дано описание и приведены расчетные параметры криогенного теплового ключа.

Тепловой ключ представляет собой 2 коаксиальных медных трубки, заключенных в герметичный кожух из нержавеющей стали. Теплопроводность ключа зависит от давления газообразного гелия в зазоре между медными трубками. При высоких температурах вставки с образцом тепловой ключ, соединяющий 2ю ступень криорефрижератора и объем с переменной температурой, должен иметь низкую теплопродность для избежания перегрева сверхпроводящего магнита, что достигается вакуумированием пространства между коакси-

альными трубками. Заполнение внутреннего пространства теплового ключа газообразным гелием значительно повышает его теплопроводность, что приводит к эффективному охлаждению вставки с образцом при низких температурах. Схема теплового ключа представлена на рис. 17.

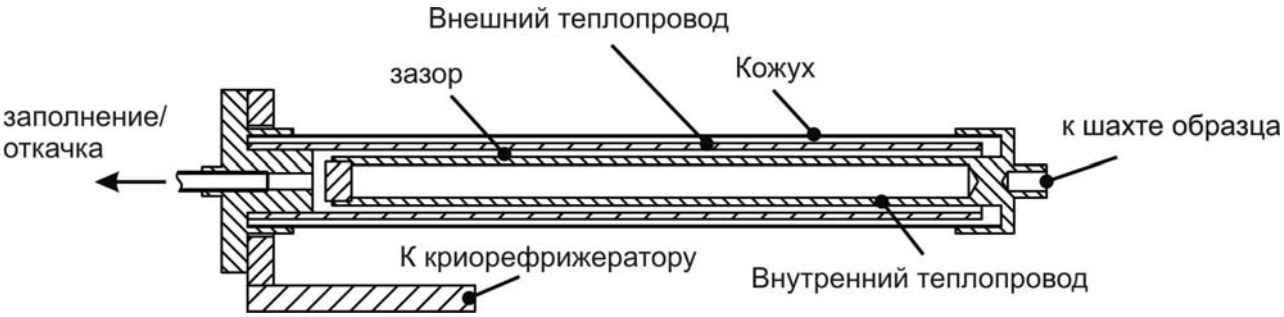

Рис.17. Схема теплового ключа.

Тепловой ключ имеет следующие параметры: длина – 100 мм, внешний кожух – трубка из нержавеющей стали 12Х18Н10Т 14х0,14 мм^2. Внутренний теплопровод – трубка из меди М1 с внешним диаметром 8 мм, толщиной 1 мм. Внешний теплопровод – трубка из меди М1 с внутренним диаметром 8.3 мм, толщиной 1 мм.

Дополнительный расчетный теплоприток ко второй ступени криорефрижератора при температуре вставки 295 К составляет 0,8 Вт при условии вакуумирования ключа с помощью форвакуумного насоса до остаточного давления 10^{-2} мм. рт. ст. При температуре шахты с образцом, равной 5.5 К, тепловым ключом от шахты образца ко второй ступени криорефрижератора может быть отведена тепловая мощность 0,188 Вт.

В четвертой части главы приведен расчет теплопритоков в криомагнитной системе. Суммарный теплоприток к 1-й ступени криорефрижератора составляет 18.2 Вт при рабочем токе 90 А и 14.2 Вт при обесточенном соленоиде, что значительно меньше её хладопроизводительности, составляющей 40 Вт при 45 К.

Суммарный теплоприток ко 2-ой ступени криорефрижератора при температуре вставки с образцом равной 295 К составляет 0.965 Вт. При низкой температуре вставки с образцом, близкой к 5 К, расчетный теплоприток ко 2-й ступени криорефрижератора не превышает 0,351 Вт, поэтому возможно ожидать, что температура сверхпроводящего соленоида будет ниже 4.2 К. Следует отметить, что хладопроизводительность 2-ой ступени криорефрижератора составляет 1 Вт при 4.2 К.

В пятой части главы приведен расчет соленоида и результаты его предварительного испытания в криостате с жидким гелием. Экспериментально были определены следующие параметры:

Критический ток: 87,82 А

Максимальное поле в центре: 8,22 Тл

Коэффициент соленоида: 93,603 мТ / А.

Критический ток соленоида достиг расчетный ток короткого образца сверхпроводника, что говорит о высоком качестве изготовления СМС.

В шестой части приведены результаты испытания криомагнитной системы. Время выхода системы на рабочий режим составляет 6 часов без какого-либо предварительного охлаждения. При этом тепловой экран охлаждается до 30К, а сверхпроводящий соленоид до 3.5 К. Зависимость температур различных компонентов системы от времени при захолаживании криомагнитной системы представлена на рис. 18.

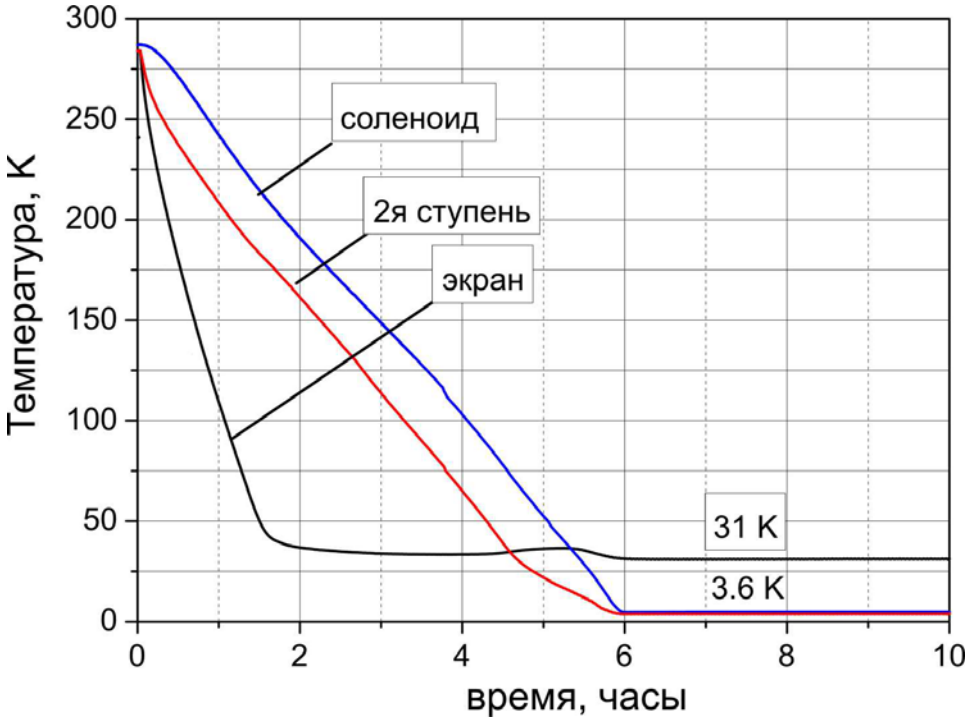

Рис. 18. Захолаживание криомагнитной системы.

При разомкнутом тепловом ключе вставка с образцом охлаждается до 50 К за счет теплопередачи излучением. Таким образом, существует два критических режима с наибольшим теплопритоком от вставки к сверхпроводящему соленоиду:

1.Температура вставки = 300 К, тепловой ключ разомкнут

2.Температура вставки = 50 К, тепловой ключ замкнут

Очевидно, что во всех других режимах теплоприток к магниту будет меньше.

Для получения промежуточных температур (5.3 – 50 К) экспериментально установлено, что остаточное давление гелия в тепловом ключе должно быть порядка 15 мм. рт. ст. При смене образца, вставка с образцом может быть охлаждена от комнатной температуры до 5.4 К за 80 минут.

Характерное время восстановления системы после перехода в несверхпроводящее состояние составляет 32 минуты. После перехода в несверхпроводящее состояние максимальная температура соленоида составляет 43.6 К.

На графике 19 представлено обобщение всех результатов испытания криомагнитной системы при различных температурах вставки с образцом и состояниях криогенного теплового ключа.

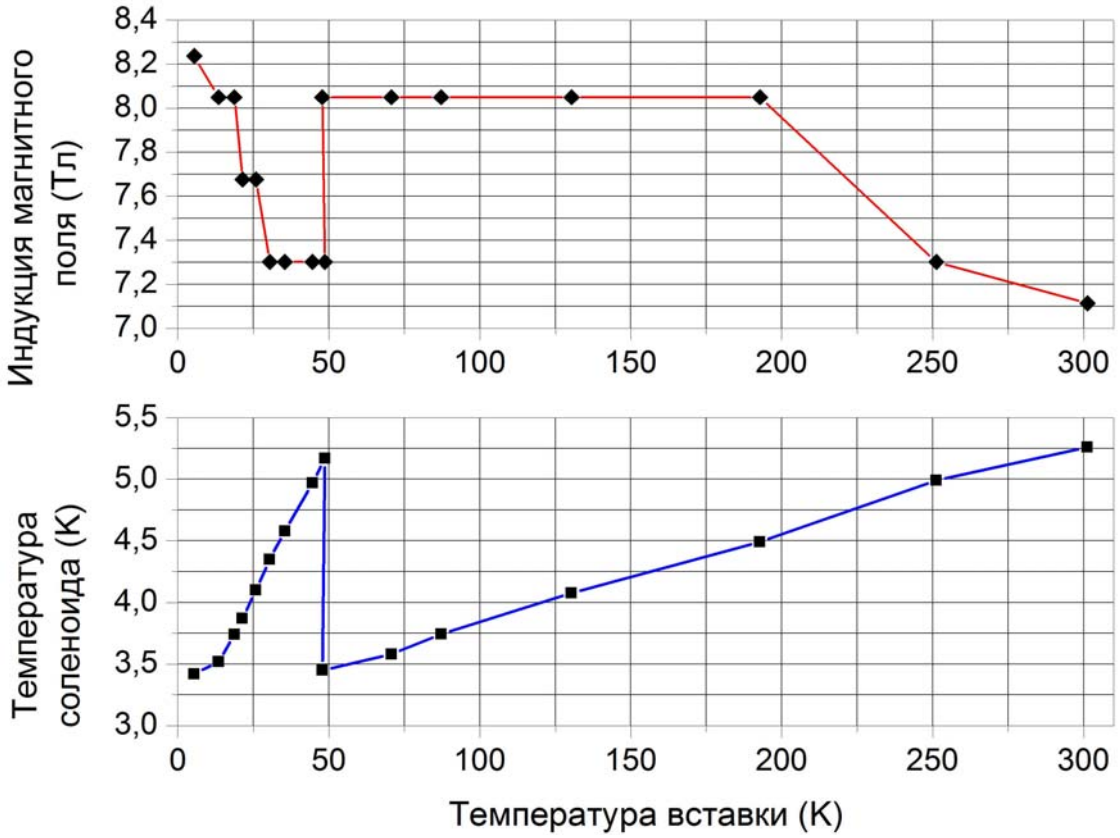

Рис. 19. Обобщение результатов испытания криомагнитной системы

Представленное на графике значение температуры соленоида является стационарным, то есть оно измерение в каждой точке продолжались до тех пор

пока температура соленоида не стабилизируется, в некоторых случаях этот процесс занимал до 2х часов.

Криомагнитная система обеспечивает температуру вставки в диапазоне 5.4 – 300 К, при этом индукция магнитного поля составляет 7.1 – 8.3 Т в зависимости от режима работы.

ВЫВОДЫ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1. Впервые ВТСП второго поколения применены в токовводах для криомагнитных систем, охлаждаемых потоком газообразного гелия без дополнительного охлаждения жидким азотом. Величины теплопритоков к жидкому гелию для представленных токовводов находятся на уровне лучших мировых образцов, изготовленных на основе ВТСП 1-го поколения для большого адронного коллайдера.

2. Проведено исследование различных методик создания электрических контактов между ВТСП проводником второго поколения и металлом. Определены условия стабильности контактов. Найдено, что Толщина серебряного стабилизирующего слоя должна составлять не менее 1 мкм.

3. Проведено исследование долговременной стабильности ВТСП проводников второго поколения. Экспериментально подтверждена стабильность критических свойств ВСТП проводников после пропускания постоянного тока составляющего 70% от критического в течение 300 часов при 77 К.

4. Предложен и реализован в среде Mathcad метод расчета критического тока ВТСП соленоида для магнитных полей с индукцией до 15 Тл

5. Разработан и изготовлен соленоид из ВТСП провода 2-го поколения. Применение метода слоевой намотки соленоида вместо широко используемой галетной технологии позволило значительно повысить плотность тока в обмотке, тем самым снизив расход проводника. Свойства ВТСП проводников 2-го поколения (значительные критические механические напряжения и высокая критическая плотность тока) позволяют использовать их для генерации магнитных полей с индукцией не менее 32 Тл при 4.2 К, что выше предельного значения для низкотемпературных сверхпроводников, составляющего 22 Тл.

6. Впервые предложен и экспериментально исследован метод обеспечения температурного режима исследуемого образца в сверхпроводящей магнитной системе на основе криорефрижератора замкнутого цикла при помощи криогенного теплового ключа.

Применение криогенного теплового ключа позволило существенно упростить конструкцию системы и отказаться от использования дополнительного криорефрижератора для обеспечения температурного режима исследуемого образца.

Изготовленная компактная криомагнитная система обеспечивает температуру вставки с образцом в диапазоне 5.4 – 300 К при индукции магнитного поля 7.1 – 8.3 Т.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. Алексеев М.П., Демихов Е.И., Костров Е.А., Мальгинов В.А., Цховребов А.М., "Исследование возможности технического применения ВТСП ленты 2-го поколения THEVA", сборник трудов 2ой международной конференции ФПС'06 (2006), стр. 257-258

2. Demikhov E, Kostrov E, Lelekhov S, Irgmaier K, Prusseit W, "Development of the 400 A 2nd generation HTS current leads", Proceedings of International Cryogenic Engeneering conferention ICEC 21, Praha, Czech Republic, 2006, pp. 273-276

3. Демихов Е.И., Костров Е.А., Цховребов А.М. «Применение ВТСП проводов 2-го поколения в сверхпроводящих магнитных системах». Научная сессия МИФИ-2008, т.7, стр.78

4. E Demikhov , E Kostrov and A Tstkhovrebov, "Vapour cooled 2G HTS current leads", Journal of Physics: Conference Series 97 (2008) 012115

5. E I Demikhov, G N Mikhailova, V P Aksenov, L H Antonova, L D Iskhakova, L N Zherikhina, E A Kostrov, S V Lavrishchev, V S Mikhailov, A V Troitskii and A M Tshovrebov, "Study of reliability of the HTS tapes in electrical circuit at 77 K", Journal of Physics: Conference Series 97 (2008) 012321

6. E. Demikhov, K. Irgmaier, E. Kostrov, W. Prusseit, A. Tstkhovrebov, L. Zherihina, "2nd generation HTS wire hybrid superconducting magnet system", ", Proceedings of International Cryogenic Engeneering conferention ICEC 22, Seoul, Korea, 2008, pp. 901-906

7. Е. И. Демихов, Е. А. Костров, "Токоввод на основе высокотемпературного сверхпроводящего материала", Патент РФ 2007133372/22

8. Е.И. Демихов, Л.Н. Жерихина, Е.А. Костров, А.М. Цховребов, "Применение ВТСП проводов 2-го поколения в сверхпроводящих магнитных системах", сборник трудов 3ей международной конференции ФПС'08 (2008), стр. 250-251

9. Г.Н. Михайлова, Е.И. Демихов, В.П. Аксенов, Л.Н. Жерихина, Е.А. Костров, В.С. Михайлов, А.В. Троицкий, А.М. Цховребов, "Долговременная ста-

бильность сверхпроводящей ленты на основе Bi(2223) и Dy(123) в цепи постоянного тока", Журнал технической физики, 2009, том 79, вып. 2, 72-75

10. E. Demikhov, E. Kostrov, V. Lysenko, N. Piskunov, and V. Troitskiy, "8 T Cryogen Free Magnet With a Variable Temperature Insert Using a Heat Switch", IEEE Transactions on applied superconductivity, vol. 20, No. 3, 612-616, June 2010

11. E. Demikhov, E. Kostrov, V. Lysenko, N. Piskunov, and V. Troitskiy, "8 T cryogen free magnet with variable temperature space", Journal of Physics: Conference Series 234 (2010) 032031

Цитируемая литература:

[1]М. Уилсон, Сверхпроводящие магниты, Москва, Мир, 1986.

[2] K. Shiohara, S. Sakai, S. Ohki, Y. Yamada, K. Tachikawa et al, "Transport performance of a HTS current lead prepared by the TFA-MOD processed YBCO tapes", Physica C 469 (2009) 1870–1872

[3] Good, A. Allit, L. Martini, "13000 A current leads with 1.5 W heat load to 4.5 K for the large hadron collider at CERN", Physica B 284-288 (2000) 2093-2094

[4] B. Zeimetzy, S. Dou and H. Liu, "Vapour cooled high Tc current leads utilizing Bi-2223/Ag tapes", Supercond. Sci. Technol. 11 (1998) 1091–1094

[5]http://www.shicryogenics.com/ - официальный сайт SHI Cryogencs group

[6]http://www.cryogenic.co.uk – официальный сайт Cryogenic Limited

[7] R. P. Bywaters, R. A. Griffin, "A gas-gap thermal switch for cryogenic applications", Cryogenics, vol. 13, 6, pp. 344-349

[8] G. Celentano, A. Augieri, A. Mauretti et al., "Electrical and mechanical characterization of coated conductors lap joints", IEEE Transactions on applied superconductivity, vol. 20, No. 3, 1549 - 1553, 2010

[9] K. S. Chang et al., "Experimental analysis of a splice method between YBCO coated conductors on various bending diameters", IEEE Transactions on applied superconductivity, vol. 20, No. 3, 1577-1581, 2010

[10]G.N. Mikhailova, A.M. Prokhorov, L.Yu. Shchurova, A.V. Troitskii, Physica C, v. 408-410 (2004) pp.692-693.

[11] A. Ballarino, "HTS current leads for the LHC magnet powering system", Physica C 372–376 (2002) 1413–1418

[12] D. Turrioni, E. Barzi, M. J. Lamm, R. Yamada, A. V. Zlobin, A. Kikuchi, " Study of HTS Wires at High Magnetic Fields", IEEE Transactions on Applied Superconductivity 19, No. 3, Part 3, 3057 - 3060 (2009)