

На правах рукописи

БРАГИН Алексей Владимирович

**ТОНКИЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СОЛЕНОИД
ДЛЯ ДЕТЕКТОРА КМД-3**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

НОВОСИБИРСК – 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

- МЕЗЕНЦЕВ
Николай Александрович – доктор физико-математических наук,
Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.
- КОВАЛЕНКО
Александр Дмитриевич – доктор физико-математических наук,
Объединённый институт ядерных
исследований, г. Дубна, Московская обл.
- ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ – Институт сверхпроводимости и
физики твёрдого тела РНЦ
«Курчатовский институт», г. Москва.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2009 г.
в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.01
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

Адрес: 630090, Новосибирск-90,
проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения
Российской академии наук Института ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН.

Автореферат разослан: «_____» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



А.В. Бурдаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В ИЯФ на накопителе ВЭПП-2000 будут работать два детектора элементарных частиц: сферический нейтральный детектор (СНД) и универсальный криогенный магнитный детектор (КМД-3). Основными параметрами элементарных частиц, измеряемыми в детекторах, являются энергия и импульс. Фундаментальным принципом определения импульса заряженной частицы является измерение кривизны траектории частицы в магнитном поле.

Целью данной работы является разработка тонкого сверхпроводящего соленоида для создания магнитного поля в центре детектора КМД-3. Решение физических задач детектора КМД-3 с использованием сверхпроводящего соленоида определяет актуальность работы.

Многочисленные физические задачи детектора КМД-3 делятся на две группы: 1) прецизионное измерение фундаментальных констант и изучение фундаментальных симметрий физики элементарных частиц; 2) изучение эксклюзивных каналов адронных сечений и связанной с ними физики адронов при низких энергиях.

Основное требование к конструкции соленоидов физики элементарных частиц состоит в минимизации толщины соленоида в терминах радиационной длины. При этом элементарные частицы, проходя через элементы конструкции соленоида, будут терять меньше энергии, что уменьшает систематическую ошибку при измерении их энергии. Это требование является определяющим и для того, чтобы соленоид был сверхпроводящим, поскольку плотность тока в сверхпроводящем материале в тысячи раз выше, чем в традиционных резистивных магнитах, работающих при комнатной температуре.

Более 30 лет используются сверхпроводящие соленоиды в детекторах элементарных частиц. До настоящего времени существует устойчивая тенденция при создании соленоидов для физики элементарных частиц использовать сверхпроводящий кабель на основе NbTi/Cu, стабилизированный чистым алюминием, т.е. помимо традиционной медной матрицы кабель имеет объемную дополнительную часть из алюминия, рис. 1. Такой подход позволяет повысить стабильность магнита, особенно больших размеров, и защитить магнит при внезапном переходе в нормальное состояние – срыве сверхпроводимости. Выбор в пользу алюминия обусловлен его низким электрическим сопротивлением и прозрачностью для элементарных частиц. С середины 1980-х годов алюминиевый стабилизатор соединяется с основным кабелем методом экструзии.

Однако вплоть до середины 1990-х годов эти соленоиды были далеки от возможности иметь минимальную радиационную толщину. Это связано с

малой механической прочностью сверхчистого алюминия, который играет второстепенную роль в сверхпроводящей обмотке. Этим обуславливается проделанная работа по повышению механической прочности алюминиевого стабилизатора, рис. 1.

A. Yamamoto / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 453 (2000) 445–454

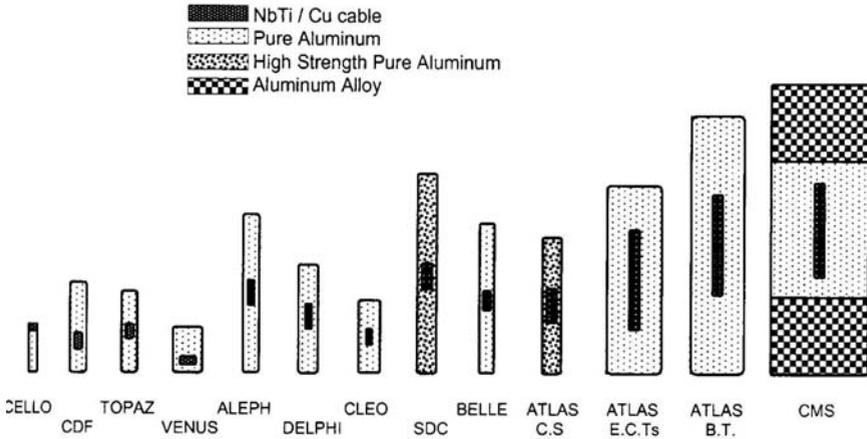


Рис. 1. Примеры сверхпроводящих кабелей для детекторов физики элементарных частиц. Показано стремление увеличить прочность стабилизатора.

В ИЯФ существует опыт создания сверхпроводящих соленоидов, которые не используют СП кабель с алюминиевым стабилизатором – соленоиды детекторов КМД-2 и КЕДР. Витки сверхпроводящих обмоток этих соленоидов равномерно шунтированы – они впаяны в канавки нержавеющей бобины. Такой подход обеспечивает защиту соленоидов во время срыва сверхпроводимости и позволяет создать механически прочную обмотку. К основным недостаткам этих соленоидов относятся: очень маленькая величина межвиткового сопротивления и использование гелиевой ванны в качестве способа поддержания обмотки при гелиевой температуре. Величина межвиткового сопротивления влияет на скорость подъема поля, потери гелия и создает трудности со стабилизацией магнитного поля в объеме детектора. Использование гелиевой ванны требует дополнительного материала в структуре обмотки и может создавать аварийную ситуацию при внезапном переходе соленоида в нормальное состояние. Радиационная толщина этих магнитов является достаточно высокой из-за использования в конструкции нержавеющей стали.

Разработанный соленоид детектора КМД-3 имеет следующие оригинальные конструктивные особенности, которые позволяют достичь минимальной радиационной толщины:

1) обмотка соленоида состоит из двух слоёв СП кабеля намотанного на алюминиевую бобину снаружи и изнутри. При этом электрически изолированный СП кабель уложен и вклеен в винтовую канавку, выточенную в бобине, что обеспечивает стабильность механическую обмотки;

2) витки обмотки разбиты по секциям по пять витков в каждой; каждая секция шунтирована сопротивлением – используется метод защиты путем секционирования. Величина шунтирующего сопротивления оптимизирована;

3) наружная и внутренняя поверхности соленоида покрыты полосками; из сверхчистого алюминия с высокой теплопроводностью, для обеспечения гелиевой температуры и ускорения перехода обмотки в нормальное состояние. Для секционированной и сухой обмотки это новое решение;

4) жидкий гелий косвенно охлаждает соленоид, поступая в медную трубку на одном торце соленоида. Гелий находится в режиме пузырькового кипения при атмосферном давлении и пар уходит из трубки в результате естественной конвекции. Это позволяет эксплуатировать соленоид как обычный криостат.

Цель работы

Разработка и изготовление тонкого сверхпроводящего соленоида детектора КМД-3, для обеспечения магнитного поля 1,5 Т в объеме $\varnothing 0,7 \times 0,9$ м. Радиационная толщина сверхпроводящей обмотки должна быть минимальной: на момент проектирования, 1999 г., она имела самое минимальное значение для детекторов физики элементарных частиц.

Разработка криогенной системы соленоида, которая должна использовать жидкий гелий, находящийся при атмосферном давлении в криостате и иметь оптимальный расход гелия.

Научная новизна

1. Разработан, испытан и установлен на детектор тонкий сверхпроводящий соленоид на основе оригинальной конструкции, имеющий радиационную толщину одну из минимальных в мире.

2. Разработана новая технология изготовления секционированной сверхпроводящей обмотки тонкого соленоида, сочетающая использование шунтов и полосок из сверхчистого алюминия. Впервые описано и экспериментально подтверждено действие двух пассивных способов защиты соленоида - секционирования и индуктивно связанных контуров.

3. Разработана и испытана криогенная система, охлаждающая секционированный соленоид в режиме естественной конвекции и за счет косвенного охлаждения обмотки. Показана работа такой системы при использовании

только жидкого гелия, без использования жидкого азота. Система безопасно ведет себя при срывах сверхпроводимости в магнитной системе.

Практическая ценность работы

Использование минимального количества материала для создания соленоида в детекторе КМД-3 позволит с лучшей точностью измерить энергию элементарных частиц внешними калориметрами детектора.

На основе полученных результатов можно разрабатывать секционированные соленоиды с рекордно низкой толщиной для детекторов элементарных частиц.

Также можно создавать и внедрять сверхпроводящие устройства, использующие секционированную защиту и СП преобразователь в качестве источника питания. Это позволит иметь надежные и компактные магнитные системы с малым расходом хладагентов.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинаре в Институте ядерной физики СО РАН и на следующих конференциях: МТ-17 (Женева, Швейцария, 2001), INSTR-02 (Новосибирск, 2002), МТ-18 (Мориока, Япония, 2003), МТ-19 (Генуя, Италия, 2005), МТ-20 (Филадельфия, США, 2007).

Личный вклад автора

Автор участвовал во всех этапах создания соленоида: в разработке конструкции соленоида и криогенной системы, в проведении расчетов. Непосредственно изготавливал обмотку, самостоятельно проводил испытания криогенной и магнитной систем и сделал анализ результатов.

Структура работы

Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения. Объем диссертации составляет 146 страниц, содержит 65 рисунков и 15 таблиц. Список литературы включает 83 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении кратко сформулированы основные задачи работы. Обсуждены её актуальность и результаты предыдущих аналогичных разработок.

В первой главе приводится обзор тонких соленоидов для детекторов элементарных частиц. Подробно описывается традиционный подход к созданию тонких соленоидов на основе использования сверхпроводящего кабеля со стабилизатором из сверхчистого алюминия, рис. 1. Указаны достижения в разработке кабеля с алюминиевым стабилизатором. Описан опыт разработки метода защиты сверхпроводящих соленоидов на основе секционирования; двенадцатилетняя работа была проведена группой из ФИАН. Описано использование разновидности этого метода для создания

соленоидов на примере детекторов КМД-2 и КЕДР. Приведены основания для создания тонкого соленоида для детектора КМД-3 на основе метода секционирования, а не с использованием алюминиевого стабилизатора.

Во второй главе описана схема детектора КМД-3. Основными компонентами магнитной системы детектора являются: соленоид, сверхпроводящий трансформатор и железное ярмо. Указаны конструктивные особенности размещения сверхпроводящего соленоида в общем вакуумном объеме вместе с LHe калориметром. Описана конструкция соленоида, рис. 2, имеющая толщину обмотки $0,085 \cdot X_0$, таб. 1. Приведены магнитные, механические и тепловые расчеты соленоида.

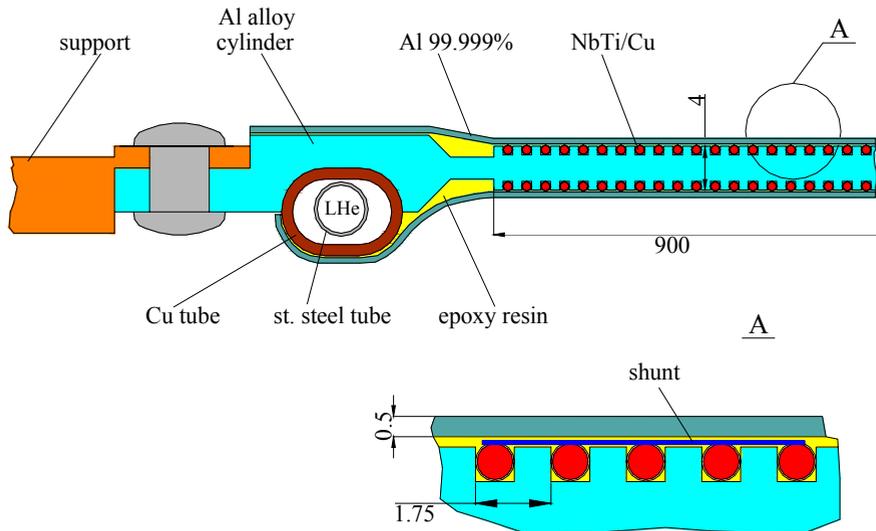


Рис. 2. Конструкция соленоида.

Особое внимание уделено расчетам распространения нормальной зоны при срыве соленоида, описано влияние шунтов. Описаны механизмы, ускоряющие срыв сверхпроводимости, оценена максимальная температура соленоида после срыва. Показано, что действие механизмов ускоряющих срыв сверхпроводимости увеличивается с приближением величины рабочего тока в соленоиде к критическому.

Подробно описаны этапы отработки технологии изготовления соленоида; указаны неустраняемые серьезные дефекты изготовления обмотки.

Таблица 1. Вклад элементов конструкции соленоида в радиационную толщину обмотки.

Материал	Толщина		Радиационная толщина		Доля материалов, %
	X, мм	X ₀ мм	X/X ₀	X/X ₀	
СП кабель NbTi/Cu = 1/1	0.68	17.7	0.0384	45.0	
Бобина, Al	3.07	88.9	0.0345	40.4	
Полоски, Al 99.999 %	1.0	88.9	0.0112	13.1	
Шунты, L63	0.001	14.3	6.0*10 ⁻⁵	0.1	
Эпоксидный компаунд, C	0.22	188	0.0012	1.4	
<i>Итого по обмотке, X_{tot}</i>			0.0854	100	
Вакуумный объем, Al	2	88.9	0.0225		
Радиационные экраны, Al	2	88.9	0.0225		
<i>Итого</i>			0.1304		

В третьей главе описана разработка криогенной системы соленоида. Особенностью криогенной системы является использование жидкого гелия при атмосферном давлении, который охлаждает соленоид с одного торца. Наполнение гелиевой емкости осуществляется переливом из транспортного сосуда Дьюара, как для обычного криостата.

Жидкий гелий из накопительной емкости поступает в соленоид в результате естественной конвекции, при которой пар и жидкость идут на встречу друг другу по индивидуальным каналам коаксиальной трубки, рис. 3.

Испаряющийся гелий идет на охлаждение опоры соленоида и экранов криогенной системы. Такая схема позволяет использовать энтальпию гелия, что делает криогенную систему самосогласованной и эффективной, чем криогенная система, использующая жидкий азот для этих целей. Кроме этого, жидкий азот независимо используется криогенной системой LXe калориметра; эта система взаимодействует с криогенной системой соленоида и влияет на испаряемость гелия.

Приведены расчеты режимов эксплуатации криогенной системы. Минимальный приток тепла к соленоиду составляет 1,4 Вт. Для охлаждения соленоида потребуется около 200 л жидкого гелия.

В четвертой главе описаны испытания криогенной системы и соленоида на отдельных стендах.

Проведены испытания гелиевой емкости, в результате которых были подтверждены расчетные параметры: испаряемость гелия составляла 2,5 л/сут. Описаны испытания криогенной системы на стенде при охлаждении соленоида до гелиевой температуры. Получены расчетные параметры охлаждения соленоида: охлаждение соленоида происходило за 14 часов при расходе около 200 л.

Испытания соленоида проходили в специальном вакуумном объеме, имеющим габариты близкие к проектному. Стендовое железное ядро в испытаниях не имело полюсов, позволяющих получить однородное поле

внутри соленоида. В связи с этим на краях соленоида магнитное поле было в 1,4 раза выше, чем в центре.



Рис. 3. Схема криогенной системы детектора КМД-3.

Соленоид подвергся пяти срывам сверхпроводимости по разным причинам на стенде. Ток при срывах составлял от 45 до 75% от проектного. Подтверждено эффективное действие секционирования при срыве сверхпроводимости и действие вторичных контуров, баланс энергии при срыве показан в Таб. 2. Таблица построена на основе измеренной температуры обмотки после срыва, позволяющая вычислить выделившуюся энергию в обмотке. Аналогично вычислялась энергия в экране. Полная энергия вычислялась из моделирования с помощью ANSYS.

Таблица 2. Баланс энергии при срывах; энергия в кДж.

Магнитное поле, В, Т	Ток, I, А	Энергия в соленоиде	Энергия в экране	Энергия в железе и др.	Полная энергия
0,6	480	31,8 (60%)	9,2 (17%)	12,5 (23%)	53,5
0,74	592	38,9 (47%)	20,4 (25%)	22,0 (28%)	81,3
0,8	640	42,9 (45%)	23,0 (23%)	31,1 (32%)	95
1,0	800	62,8 (42%)	31,7 (21%)	55,5 (37%)	150

Проведен анализ полученных измеренных характеристик соленоида при срыве сверхпроводимости. Действие одного вторичного контура приводит к уменьшению амплитуды тока в соленоиде при срыве по формуле:

$$I_1 = \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2} I_0, \text{ где } I_0 - \text{начальный ток в соленоиде, } I_1 - \text{ток в соленоиде при}$$

действии вторичного контура, τ_1 – собственное время затухания соленоида на сопротивлении СП кабеля, τ_2 – собственное время вторичного контура (экрана). Например, при температуре СП кабеля около 50 К $\tau_1 = 0,162$ с, $\tau_2 = 0,024$ с, что приведет к уменьшению амплитуды в 0,87 раз. Поскольку температура СП кабеля непрерывно повышается при затухании тока, то действие вторичного контура будет увеличиваться.

Проведена оценка максимальной температуры СП кабеля после срыва сверхпроводимости. За основу взята формула адиабатического выделения тепла в СП проводе при срыве:

$$U(\Delta T) = \int_{4,2}^{\Delta T} \frac{\gamma C_p(T) dT}{\rho(T)} = (1 - \lambda) \cdot j_0^2(t) \cdot \Delta t,$$

где j_0 – плотность тока в медной матрице, Δt – общее время затухания, γC_p , ρ – удельная теплоемкость и сопротивление СП кабеля, λ – коэффициент заполнения сверхпроводника. Было показано, что при расчете по этой формуле температуры СП кабеля после срыва без учёта вторичных контуров, температура СП кабеля превысила бы температуру 1200 К, т.е. температуру плавления меди.

Общее время затухания, Δt , включает время распространения нормальной зоны вдоль СП кабеля, например от точки зарождения нормальной зоны до входа в соленоид. Затухание тока в соленоиде зависит от скорости нагрева кабеля и скорости повышения температуры в элементах обмотки. Оба этих процесса зависят от плотности тока в проводе, как это было описано в главе 2. Также из Таб. 2 видно, что действие вторичных контуров уменьшается при срыве на малых токах. Отсюда был сделан вывод, что для секционированного соленоида КМД-3 максимальная температура СП кабеля будет при токах, имеющих отношение $I_{\text{раб}}/I_{\text{крит}} < 50\%$.

В ходе испытаний на стенде получены следующие результаты: достигнут ток в соленоиде 1 кА (93% от проектного), рис. 4.

При этом на обмотке магнитное поле составляло 1,74 Т (115% от проектного), а температура на соленоиде была около 4,6 К (выше на 0,3 К проектной), рис. 5. При таком токе соленоид сжимался осевой силой величиной около 19 т, которая в детекторе будет составлять не более 6 т (из-за насыщения железа). Данные результаты позволяют утверждать, что соленоид способен работать в детекторе при проектном значении магнитного поля.

Криогенная система успешно выдержала магнитные испытания соленоида: наполнение гелиевой емкости не вызывало заметных скачков температуры на соленоиде; при срыве сверхпроводимости не было отмечено никаких отрицательных последствий для системы. Охлаждение соленоида показано на рис. 6.

Таким образом, испытания показали, что соленоид и криогенная система готовы к работе на детекторе КМД-3.

В пятой главе описана работа соленоида и криогенной системы в детекторе КМД-3. Соленоид и криогенная система были установлены в детектор и прошли серию испытаний в течение полутора лет. Магнитное поле в детекторе поднималось до 1,38 Т. Стабильный расход гелия составлял около 3,5 л/ч (минимальное значение 3,1 л/ч). Соленоид испытал 19 срывов на детекторе при токе от 480 до 980 А. Успешно прошли испытания все элементы криогенной системы, которые были спроектированы для работы в детекторе. Установлено заметное влияние вихревых токов на конструктивные элементы детектора при срыве сверхпроводимости соленоида. Это следует считать особенностью срыва для секционированного соленоида, поскольку характерное время затухания тока в соленоиде составляло 45 мс, что почти на порядок выше, чем у соленоидов с СП кабелем, имеющим алюминиевый стабилизатор.

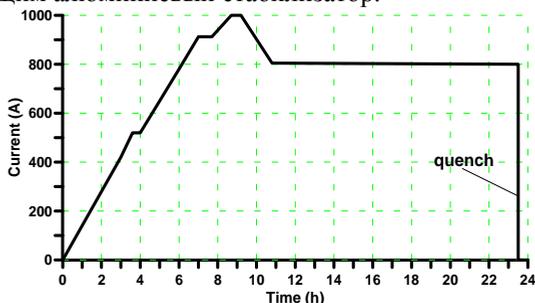


Рис. 4. Ввод тока в соленоид при испытаниях.

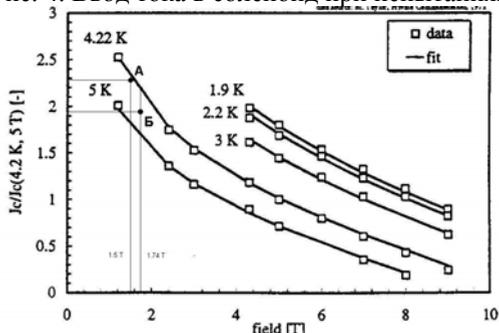


Рис. 5. Сравнение проектной величины критического тока – точка А и полученной в испытаниях – точка В.

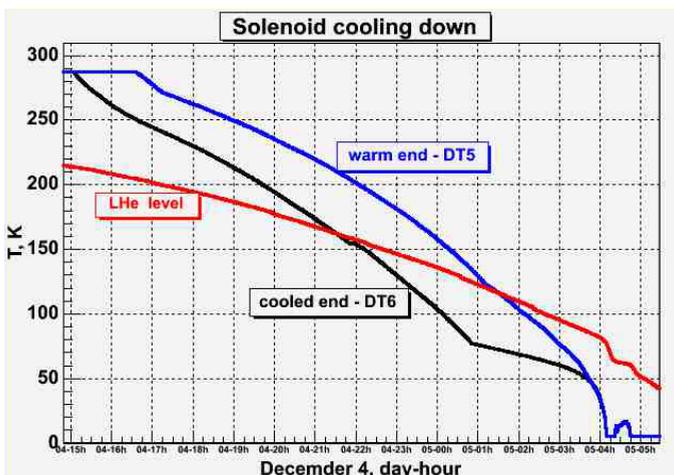


Рис. 6. Охлаждение соленоида. На рисунке показано понижение температуры на концах соленоида и понижение уровня гелия в сосуде Дьюара.

На рис. 7 показано затухание магнитного поля и косвенно тока в соленоиде. Срыв сверхпроводимости был искусственно спровоцирован источником питания, можно считать, что соленоид перешел в нормальное состояние целиком, в течение 5 мс. Из рисунка хорошо видно, что ток в соленоиде – напряжение на участке высокоомной матрицы СП преобразователя V1, спадает за ~ 45 мс, тогда как магнитное поле падает за 160 мс. Существование магнитного поля после 45 мс связано с протеканием токов вихревых, но в соленоиде ток почти затух. Это ещё одно подтверждение сильного действия вторичных контуров при срыве сверхпроводимости.

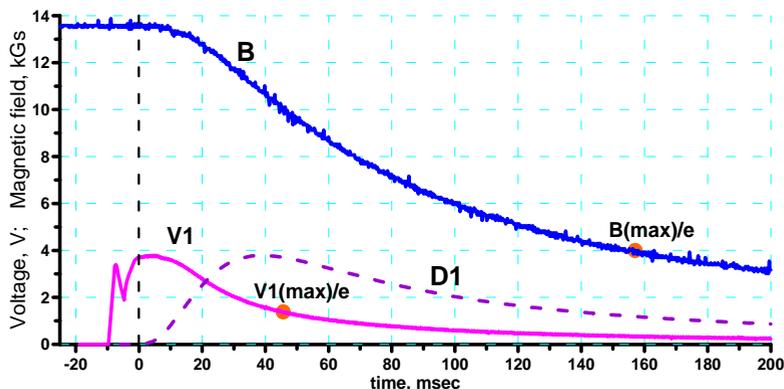


Рис. 7. Затухание тока и магнитного поля при искусственном срыве сверхпроводимости при 13,5 кГс. В – магнитное поле, V1 – напряжение,

пропорциональное току в сверхпроводящей цепи. Точками отмечено уменьшение соответствующей величины в 2,718 раз.

В таблице 3 приведена статистика срывов соленоида за всё время работы с ним. В таблице 4 показаны энергетические параметры по срывам сверхпроводимости в зависимости от различных причин и условий испытаний. Хорошо видна зависимость: чем выше ток, тем меньше энергии усваивает соленоид. Срыв СП трансформатора приводит к появлению напряжения в СП цепи, которое греет шунты соленоида. Это приводит к срыву соленоида целиком, что также уменьшает количество усвоенной соленоидом энергии. Таким образом, срыв соленоида спасает СП трансформатор от повреждения.

Таблица 3. Статистика всех срывов сверхпроводимости.

Причина срыва	Количество срывов	I, А
1. СП трансформатор	9	
достигнут предельный ток	2	640
сбой в работе	7	713-927
2. СП кабель на входе в соленоид	7	
тепловое пятно	6	480-913
механическое крепление	1	984
3. Криогенная система	4	
переливной сифон	2	713, 927
ухудшился вакуум	1	713
ошибка при переливе гелия	1	856
4. Принудительный срыв	3	800, 960
5. Тепловое пятно на соленоиде	1	823
<i>Всего срывов</i>	<i>24</i>	

Срыв СП кабеля является наихудшим вариантом срыва в СП цепи, особенно на малых токах, в этом случае соленоид усваивает больше энергии, как описано в предыдущей главе. Таблица 4 позволяет качественно оценить работу конструктивных элементов детектора в роли вторичных контуров. Например, в будущем можно искусственно размещать медные кольца с нужной τ_2 на торцах соленоида для защиты при срыве.

Рассмотрены дальнейшие возможности по созданию соленоидов с рекордно малой радиационной толщиной на основе метода секционирования, что позволит получить рекордно тонкие соленоиды для детекторов элементарных частиц.

Таблица 4. Влияние условий срывов на температуру соленоида T_c и на количество энергии усвоенной соленоидом после срыва E_c .

I, А	T_c , К	E_c , кДж	$E_c/E_{\text{поль}}$, %	Условия срывов, причины
480	37	31,8	59,4	испытания, СП кабель
640	41	42,9	45,1	испытания, трансформатор
800	46	62,8	41,9	испытания, пр. трансформатор
480	42	46,9	74,9	без колец BGO, СП кабель
713	49	74,8	55,0	без колец BGO, СП кабель
713	47	66,1	48,6	без колец BGO, вакуум
856	52	91,1	46,2	без колец BGO, СП кабель
927	53	97,3	41,9	без колец BGO, трансформатор
749	47	66,1	43,8	с кольцами BGO, трансформат.
927	50	78,7	33,9	с кольцами BGO, трансформат.
927	52	91,1	39,3	с кольцами BGO, СП кабель
984	53	97,3	37,1	с кольцами BGO, СП кабель
892	51	84,9	39,5	с кольцами BGO, трансформат.*
960	54	103,5	41,3	с кольцами BGO, трансформат.*
960	55	109,8	43,8	с кольцами BGO, СП кабель*

Проведено сравнение соленоида детектора КМД-3 с тонкими соленоидами для детектора WASA и самым тонким Bess-Proto, изготовленным для экспериментов на аэростате. Радиационная толщина обмотки соленоида КМД-3 уступает соленоиду Bess-Proto на $0,03X_0$, но общее сравнение с учетом достигнутых магнитных полей и количества материалов всех элементов конструкции соленоидов показывает, что разница в радиационных толщинах этих соленоидов не превышает $0,01X_0$. Учитывая большие перепады температур после срыва сверхпроводимости в соленоиде Bess-Proto, в пределах 20-140 К по длине соленоида, было сделано утверждение, что тонкие соленоиды на основе алюминиевого стабилизатора находятся на пределе технологических возможностей. При этом в соленоиде КМД-3 заметных перепадов не было обнаружено, а общая температура не превышала 55 К, Таб. 4. Это позволяет также утверждать, что разработанная технология создания сверхпроводящих соленоидов на основе метода секционирования может быть в дальнейшем продолжена.

В Заключение перечислены основные результаты работы:

1. Разработан и испытан тонкий соленоид, имеющий радиационную толщину одну из минимальных среди соленоидов разработанных ранее. Тонкий соленоид позволит измерять энергию частиц с более высокой точностью.

2. Разработана пассивная защита соленоида от срыва сверхпроводимости, приводящая к диссипации менее 45% запасенной энергии в соленоиде при рабочих значениях тока.
3. Разработана и испытана криогенная система, позволяющая использовать жидкий гелий, охлаждающий соленоид косвенным образом за счет естественной конвекции, а также использующая испаряющийся гелий. Испытания показали надежность и эффективность работы системы.
4. Магнитная система детектора испытала большое количество срывов сверхпроводимости, что подтверждает её надежность и работоспособность. Отмечено значительное влияние вихревых токов на конструктивные элементы детектора из-за очень быстрого затухания магнитного поля при срыве.
5. Полученные результаты можно использовать для проектирования соленоидов, имеющих меньшую радиационную толщину. Также можно проектировать экономичные сверхпроводящие магнитные системы, использующие сверхпроводящие преобразователь и секционированный магнит, например, при создании сверхпроводящих вигглеров.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] L.M. Barkov, N.S. Bashtovoy, A.V. Bragin, et al. "Superconducting magnet system of CMD-2 detector", IEEE Transactions on Applied superconductivity, p. 4644, n.4, vol.9, 1999.
- [2] L.M. Barkov, A.V. Bragin, et al. "Development of the superconducting solenoid for the CMD-2M detector", NIM A 494 (2002) pp. 270-273.
- [3] L.M. Barkov, A.V. Bragin, et al. "Power supply system for the superconducting solenoid for the CMD-2M detector", NIM A 494 (2002) pp. 274-276.
- [4] S.V. Karpov, .. Bragin A.V. et al "Superconducting power supply for thin superconducting solenoid of the CMD-3 detector", IEEE Transactions on Applied superconductivity", 2006, vol. 16, p. 1642.
- [5] Э.В. Анашкин, .. Брагин А.В. и др., «Криогенный магнитный детектор КМД-2», ПТЭ, 2006, №6, с. 50.
- [6] A.V. Bragin, et al "Test results of the thin superconducting solenoid for the CMD-3 detector", IEEE transactions on Applied superconductivity", 2008, vol. 18, p. 399.

БРАГИН Алексей Владимирович

**Тонкий сверхпроводящий соленоид
для детектора КМД-3**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Сдано в набор .17.10. 2009 г.

Подписано в печать 17.10. 2009 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 29

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11