



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-97-209 e

На правах рукописи
УДК 621.384.6

C-506

СМИРНОВ
Анатолий Алексеевич

**РАЗРАБОТКА
И СОЗДАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ НУКЛОТРОНА —
УСКОРИТЕЛЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР
НА БАЗЕ БЫСТРОЦИКЛИРУЮЩИХ
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ
С ТРУБЧАТОЙ ОБМОТКОЙ**

Специальность: 01.04.13 — электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Дубна 1997

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Оганесян
Рубен Цолакович

доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Овсянников
Владимир Петрович

доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Козлов
Святослав Иванович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт физики высоких энергий, г. Протвино

Защита диссертации состоится "_____" _____ 1997 года
в "_____" часов на заседании диссертационного совета Д-047.01.02
в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных
исследований, г. Дубна, Московской области, конференц-зал ЛВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "_____" _____ 1997 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета -
доктор физ.- мат. наук, профессор

М.Ф. Лихачев

М.Ф. Лихачев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Предпринятая с начала 70-х годов модернизация синхрофазотрона в значительной степени решила на многие годы проблему создания собственной базы ОИЯИ для проведения физических экспериментов в области физики высоких энергий.

В Лаборатории высоких энергий ОИЯИ академиком А.М.Балдиным развивается новое научное направление - релятивистская ядерная физика. Одним из важнейших результатов этих исследований на синхрофазотроне ОИЯИ явилось установление границ области энергии предельной фрагментации ядер, лежащей в пределах 3,5 ГэВ/нуклон, определяющей начало асимптотического режима и возможности исследования кварк-глюонных степеней свободы в ядрах.

В перспективе развитие этого направления было бы невозможно без улучшения временных и пространственных характеристик выведенных пучков, повышения энергии и интенсивности ускоренных ядер, ускорения средних и тяжелых ядер. На синхрофазотроне это было неосуществимо в виду целого ряда его конструктивных особенностей.

В начале 70-х годов во многих исследовательских центрах мира, занимающихся изучением вопросов фундаментальной физики атомного ядра и строением ядерной материи, ученые ускорительщики вступили в соревнование по созданию новых технологий для внедрения техники сверхпроводимости в основные приборы физического эксперимента - ускорители заряженных частиц. Были разработаны сверхпроводящие магниты с чрезвычайно сложной технологией изготовления, получивших название магниты типа "cos θ ".

Максимальная величина индукции магнитного поля в этих магнитах (в зависимости от температуры криостатирования) для разных конструкций лежит в диапазоне 3,5 ÷ 8 Тл. Поле в них формируется с помощью многовитковой, как правило, двухслойной обмотки из сверхпроводящего кабеля типа "плоская скрутка", сжатой бандажирующими кольцами и окруженной шихтованным магнитным экраном.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

В период с 1973 по 1975 гг. в ЛВЭ ОИЯИ по инициативе А.М.Балдина также начинается разработка проблемы создания сверхпроводящего жесткофокусирующего ускорителя релятивистских ядер - Нуклотрона с ориентировкой на сверхпроводящие магниты с максимальными уровнями индукции полей ~ 5 Тл типа "cos θ " для замены синхрофазотрона.

Такой вариант замены, ввиду эффекта "замороженных токов" в сверхпроводящих магнитах, требует введения "теплого" бустерного каскада для обеспечения условий нормального инжектирования ядер в сверхпроводящее кольцо с относительно качественным магнитным полем и последующим ускорением ядер до конечной энергии $12 \div 15$ ГэВ/нуклон.

Это был неоправданно дорогой проект, не учитывающий финансовые возможности ЛВЭ и ОИЯИ и, в общем то, не решавший до конца задачу существенного развития ускорительного комплекса ЛВЭ.

По этой причине в период 1978-1979 гг. в ЛВЭ ОИЯИ начались поиски новой концепции Нуклотрона и создано свое направление развития простых в изготовлении, недорогостоящих сверхпроводящих магнитных систем для синхротронов с уровнями индукции магнитных полей $1,8 \div 2$ Тл в гибридном варианте, по аналогии с "теплым" вариантом, имеющих ферромагнитный магнитопровод с полюсами, формирующими необходимую конфигурацию поля, и сверхпроводящую обмотку возбуждения, из разработанного в ЛВЭ трубчатого сверхпроводящего кабеля.

На основе полученных при испытаниях этих магнитов данных было сделано убедительное обоснование возможности создания однокаскадного Нуклотрона с конечной энергией ускоренных ядер ~ 6 ГэВ/нуклон, работающего с частотой циклирования $0,5 \div 1$ Гц.

Для выхода в асимптотическую область энергий релятивистских ядер (значительно выше 6 ГэВ) необходимо существенное развитие ускорительного комплекса ЛВЭ, отвечающему прогнозируемому уровню других мировых центров и перспективным программам физических исследований.

Оценка финансовых и производственных возможностей ОИЯИ показывает, что реальной перспективой для ОИЯИ в части создания

собственной экспериментальной базовой установки является создание сверхпроводящего ускорительного комплекса - Супернуклотрона с энергией ускоряемых ядер ~ 60 ГэВ/нукл. из магнитов нового типа.

Цель работы. Диссертация является обобщением работ, выполненных в соответствии с научно-техническими планами ЛВЭ ОИЯИ по развитию ускорительной базы Лаборатории, и заключается в научном обосновании и реализации наиболее оптимальных технических решений, предложенных автором, определяющим образом способствующих созданию простых по конструкции и технологии изготовления, экономически эффективных и удобных в эксплуатации сверхпроводящих магнитных систем ускорителей синхротронного типа, каналов транспортировки частиц в этих ускорительных комплексах.

Научная новизна. Новая технология, предложенная автором данной работы, принципиально упрощает проблему применения сверхпроводимости в ускорительной технике и обеспечивает России и ОИЯИ приоритет в разработке и реализации простых, экономичных, высокоэффективных, сверхпроводящих, быстроциклирующих криогенно-магнитных систем синхротронов. Значимость научной новизны приведенных в диссертации результатов в части совершенствования технологии и создания криогенной магнитной системы Нуклотрона характеризуются следующими отличительными признаками: способностью сверхпроводящего ускорителя ядер работать при частоте следования циклов $0,5 \div 1$ Гц; малым количеством гелия, прокачиваемого и находящегося в системе, эффективностью её охлаждения двухфазным гелием, безопасностью работы; простой конструкцией криостата (гелиевого сосуда не требуется) и сверхпроводящих магнитов, технологичностью их изготовления; условиями работы вакуумной камеры; механической и электрической прочностью магнитов; надежностью, удобством эксплуатации, хорошей доступностью к элементам ускорителя и ремонтоспособностью; экономической эффективностью при изготовлении и эксплуатации.

По независимой оценке американских специалистов, занимающихся с 1995 года разработкой протонного коллайдера 2×100 ГэВ в Национальной

лаборатории им. Ферми, магниты с ферромагнитным магнитопроводом и трубчатой сверхпроводящей обмоткой являются наиболее перспективными по сравнению с магнитами типа "cos θ ".

Практическая ценность результатов разработок и исследований при создании быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов на основе трубчатого сверхпроводника состоит в том, что завершающей фазой этих работ стало создание нового типа сверхпроводящей магнитной системы - ускорителя релятивистских ядер - Нуклотрона, запущенного в ЛВЭ ОИЯИ в 1993 году, первого действующего сверхпроводящего ускорителя в России.

Автор диссертационной работы защищает:

1. Концепцию и основные принципы построения новой по типу сверхпроводящей магнитной системы жесткофоку-сирующего синхротрона, на примере Нуклотрона, основу которой составляют элементы магнитной оптики с ферромагнитными магнитопроводами и обмотками из трубчатого сверхпроводника.

2. Разработку проекта и технологию создания модульной конструкции магнитокриостатной системы Нуклотрона - ускорителя релятивистских ядер.

3. Новую технологию, реализованную в модельных и штатных дипольных и квадрупольных магнитах Нуклотрона, результаты теоретических и экспериментальных исследований по оптимизации параметров и технологии их изготовления.

4. Конструкцию, технологию изготовления и результаты экспериментальных исследований по определению характеристик сверхпроводящего кабеля в двух модификациях: для работы в импульсных полях и для постоянноточных магнитов с изолированными по электрической цепи сверхпроводящими проводами (провоолока).

5. Результаты экспериментальных исследований процесса эвакуации энергии из трубчатых сверхпроводящих магнитов Нуклотрона на внешнее сопротивление. Разработку принципа работы, схемных решений системы аварийной эвакуации энергии магнитной системы Нуклотрона и датчиков обнаружения нормальной фазы в сверхпроводящих магнитах.

6. Принцип и концепцию создания экономичных сверхпроводящих магнитов и линз для каналов транспортировки частиц прокачного типа на основе трубчатого кабеля с изолированными жилами, работающих в постоянно-точном режиме от маломощных источников питания, мощностью 1,5-2 кВт.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на IV, V, IX, X, XI, XII, XIII, XIV Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц, XVIII Международной конференции стран-членов СЭВ по физике и технике низких температур (Дрезден 1979 г.), на второй Всесоюзной конференции по техническому использованию сверхпроводимости (Ленинград, 26-28 сентября 1983 г.), Национальной конференции США по ускорителям (Санта-Фе, штат Нью-Мексико 1983 г.), на VIII Международной конференции по магнитной технологии (Гренобль, 1983 г.), на XII Международной конференции по криогенной технике (Саутгемптон, 1988 г.), на Национальной конференции США по инженерной криогенике (Альбукерк, 1993 г.), Международной конференции по криогенной технике (Генуя, 1994 г.), Национальной конференции США по прикладной сверхпроводимости (Бостон, октябрь 1994 г.), Пятой Европейской конференции по ускорителям частиц (Испания, Барселона, 1996 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 39 печатных работ, основные результаты содержатся в 30 публикациях, приведенных в списке литературы.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем составляет 91 страницу печатного текста, 33 рисунка, список литературных ссылок из 43 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Введение содержит постановку задачи, общую характеристику работ и обоснование структуры диссертации.

В первой главе приведена программа и этапы создания сверхпроводящей магнитной системы Нуклотрона, основные результаты исследований.

В соответствии с программой создания Нуклотрона в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в период 1977-1979 гг. автором было впервые предложено коренным образом упростить магнито-криостатную систему этого ускорителя, вводя в ее конструкцию элементы магнитной оптики нового типа с трубчатой сверхпроводящей обмоткой и с магнитопроводами традиционных "теплых" магнитных систем, обладающих целым рядом неоспоримых преимуществ. Для проверки новой концепции был создан модельный импульсный дипольный магнит типа "оконная рама" с обмоткой из трубчатого сверхпроводника с циркуляционной системой охлаждения, получивший название ЦСД-1 (циркуляционный сверхпроводящий диполь).

Успешные испытания первой модели, проведенные исследования по определению основных характеристик нашли свое продолжение в проекте институтского масштаба под названием "Создание полномасштабных элементов магнитной системы Нуклотрона на основе магнитов с железным ярмом и обмоткой из трубчатого сверхпроводника".

Первая очередь проекта (1981-1985 гг.) предусматривала разработку конструкции и технологию изготовления трубчатого сверхпроводящего кабеля для работы в импульсных магнитных полях, создание полномасштабного модельного магнита дипольного ЦСД-2, измерение основных параметров, определение энергетических потерь и условий криостатирования.

Вторая очередь проекта предусматривала разработку штатных дипольных и квадрупольных магнитов Нуклотрона, модульной магнито-криостатной системы Нуклотрона, отработку технологии серийного производства и испытаний.

Конечной целью второй очереди (1985-1988) проекта была опытная сборка и испытания суперпериода магнито-криостатной системы Нуклотрона для проверки в рабочих условиях принятых конструкторских решений, окончательного подтверждения возможности устойчивого параллельного криостатирования многих магнитов циркуляционным способом, определение необходимых данных для проектирования схемы эвакуации энергии из Нуклотрона.

В 1986 году был утвержден проект "Реконструкция магнитной системы синхрофазотрона на сверхпроводящую - Нуклотрон", том 2, РП-02-02, раздел "Магнитная система. Система электропитания", предусматривающий создание Нуклотрона. Автор рассматриваемой работы был научно-техническим руководителем работ по разработке и реализации этих проектов, проведения исследований и испытаний, непосредственным разработчиком основных концептуальных положений, конструктивных решений и технологий.

В период с 1988 г. по 1992 г. были запущены в серию, изготовлены и прошли комплексные испытания все 100 дипольных и 66 квадрупольных криогенно-магнитных модулей. В феврале 1990 г. успешно проведены комплексные испытания цепочки из 16 криогенно-магнитных модулей.

Захолаживание цепочки из 12 дипольных и 4 квадрупольных магнитов от комнатной до гелиевой температуры осуществлялось с помощью установки КГУ-1600/4,5 при среднем значении расхода гелия через каждый магнит $\sim 0,45$ г/с и длилось около 17 часов. В процессе испытаний инициировалось несколько десятков переходов, отказов в системе защиты и эвакуации энергии не наблюдалось.

Обмотки магнитов возвращались в сверхпроводящее состояние менее, чем через 5 минут после переходов. Магниты возбуждались непрерывными импульсами тока треугольной формы с амплитудой 6 кА, длительностью нарастания и спада по 1,55 с и периодом следования импульсов 3,5 с в течение 192 часов (около $2 \cdot 10^5$ циклов возбуждения). Перепад давления между питающим и отводящим гелиевыми коллекторами поддерживался равным 9 кПа. При этом массовое паросодержание гелия в отводящем коллекторе было около 1, а его температура 4,5 К. Криостатирование и работа магнитов были стабильны. Колебаний расхода гелия в параллельных охлаждающих каналах не наблюдалось. Работа магнитов оставалась стабильной и при значительных отклонениях параметров криостатирования от их номинальных значений. Перепад давления между питающим и отводящим коллекторами был снижен в 1,5 раза (до 6 кПа). При этом из каналов для охлаждения ярма магнитов выходил перегретый пар с температурой от 5,1 К

до 7,8 К соответственно для канала с наименьшим и наибольшим гидравлическим сопротивлением.

Первый квадрант криогенно-магнитной системы Нуклотрона был установлен в туннеле ускорителя и прошел тестовые испытания в феврале 1992 г. Потребовалось 84 часа для захлаживания 28 дипольных и 11 квадрупольных криогенно-магнитных модулей от комнатной до гелиевой температуры. Криостатирование магнитов было стабильным. Давление в вакуумной камере ускорителя $\sim 1 \cdot 10^{-7}$ Па.

Монтаж криогенно-магнитной системы Нуклотрона в туннеле был завершен в январе 1993 г., а в марте 1993 г. проведен первый сеанс ее работы.

С марта 1993 г. проведено 11 сеансов работы Нуклотрона общей продолжительностью 2580 часов, из них на проведение физических экспериментов с пучками Нуклотрона, взаимодействующих с внутренними мишенями в вакуумной камере ускорителя, было затрачено примерно 65-70% времени.



Рис.1. Общий вид кольца криогенно-магнитной системы Нуклотрона в районе канала инжекции

Вторая глава посвящена вопросам разработки сверхпроводящего трубчатого кабеля и созданию на его основе модельных дипольных магнитов Нуклотрона. Приведены основные характеристики магнитов, результаты исследований в разных режимах работы, сделаны основные выводы.

Первые исследования были проведены на экспериментальном магните ЦСД1, общий вид которого приведен на рис.2.

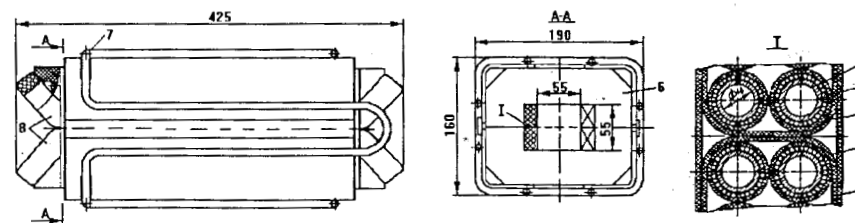


Рис.2. Конструкция магнита ЦСД-1. 1-трубка кабеля, 2-сверх-проводящий провод, 3-бандаж из стеклоленты, 4-межвитковая изоляция, 5-проставка из текстолита, 6-полуядро, 7-змеевик для охлаждения ярма, 8-полуобмотки.

Основным силовым элементом конструкции диполя типа "оконная рама" служит железное ярмо. Ярмо состоит из двух симметричных частей, изготовленных из 0,5 мм листов трансформаторной стали, двух торцевых накладок и двух продольных уголков из стали марки СТ-3, соединенных с помощью электросварочных швов в единую конструкцию полуярма.

Основные данные сверхпроводящей обмотки и параметры магнита приведены в таблице 1.

Таблица 1

Апертура	55x55 мм ²
Длина железного ярма	328 мм
Число витков в обмотке	16
Индуктивность	0,15 мГн
Длина кабеля в обмотке	16 м
Внешний диаметр кабеля	6,5 мм
Число проводов 0,5 мм в кабеле	31
Сверхпроводник	сплав /НТ-50/
Число сверхпроводящих нитей в проводе	1045
Диаметр сверхпроводящих нитей	10 мкм
Отношение сечений меди и сверхпроводника в проводе	1,39
Шаг скрутки проводов	47 мм
Шаг скрутки нитей	3 мм
Материал трубки кабеля	мельхиор
Припой	95%Sn+5%Ag
Критический ток при температуре 4,4 К	7380 А
Максимальная индукция магнитного поля	2,37 Тл

Обмотка выполнена из трубчатого кабеля, изготовленного путем навивки сверхпроводящего провода на трубку из мельхиора диаметром

5x0,5 мм, предварительно облуженного, а затем пропущенного через ванну с расплавленным припоем, содержащим 95% олова и 5% серебра.

Криостатирование магнита осуществлялось потоком двухфазного гелия с параметрами: массовое паросодержание - $0,1 \pm 1$, удельный массовый расход - $50 \div 350$ кг/м² с, максимальная температура $4,3 \div 4,7$ К.

На этой модели удалось показать, что такой тип сверхпроводящих магнитов может работать с частотой повторения циклов возбуждения, равной 1 Гц и выше.

Паяный сверхпроводящий кабель имеет большую жесткость и не годен для изготовления обмоток с небольшими радиусами изгиба.

Кроме того паяный сверхпроводящий кабель имеет большие тепловыделения (кооперативные потери) при работе в импульсных магнитных полях. Исследования показали на необходимость разработки новой конструкции сверхпроводящего кабеля для быстроциклирующих магнитов.

Сверхпроводящий кабель для изготовления обмоток возбуждения магнитов Нуклотрона проектировался, исходя из нижеследующих требований: номинальный рабочий ток - 6,0 кА; критический ток кабеля при индукциях магнитного поля - 2,5 Тл не ниже 6,8 кА; рабочее напряжение изоляционного покрытия - 2,5 кВ, минимальный радиус изгиба - $18 \div 20$ мм; изоляция должна иметь хорошую механическую прочность при температуре жидкого гелия и выдерживать большие радиационные нагрузки (суммарная поглощенная доза за время полной жизни принята равной $\sim 5 \cdot 10^6$ Грей).

При работе в изменяющихся магнитных полях наряду с величиной критического тока определяющей характеристикой сверхпроводящего кабеля становится величина потерь энергии в нем.

В соответствии с принятыми концепциями сооружения магнитной системы Нуклотрона автором была разработана новая конструкция сверхпроводящего трубчатого кабеля, базирующаяся в своем изготовлении на стандартные выпускаемые промышленностью компоненты: мельхиоровую трубку МНЖ Мц-30-11 Гост 492-23 диаметром 5x0,5мм, сверхпроводящую проволоку с медной матрицей типа СКНТ-0,5-1045-0,42 диаметром 0,5 мм,

имеющей 1045 сверхпроводящих нитей диаметром 10 мкм из ниобий-титанового сплава НТ-50, коэффициент заполнения проволоки сверхпроводником 0,42.

Конструкция сверхпроводящего кабеля для Нуклотрона приведена на рис.3. Технология его изготовления заключается в следующем: с помощью повивальной машины на трубку наматывается 31 сверхпроводящая проволока спирально с шагом транспонирования 47 мм; перед навивкой проволоки в едином процессе с намоткой на мельхиоровую трубку наносится слой эпоксидного компаунда - терморективного связующего, толщиной $0,1 \pm 0,15$ мм.

Для предотвращения отслоения сверхпроводящей проволоки от трубки (в процессе изгибания на малые радиусы при изготовлении обмотки) на сверхпроводящую проволоку кабеля наматывается поперечный бандаж из нихромовой проволоки диаметром 0,2 мм с шагом - 0,3 мм и затем наматывается ленточное изоляционное покрытие.

Изоляция сверхпроводящего кабеля состоит из 4-х слоев полиимидной пленки (два слоя с 50%-м перекрытием) толщиной 40 мкм каждый (в сумме 160 мкм) и 2-х слоев стеклоленты толщиной 0,1мм, обильно пропитанной терморективным эпоксидным компаундом с добавкой силиконового каучука, которая вводится для поглощения энергии, передаваемой от частиц эпоксидной смолы к частицам каучука, возникающей от нарушения микроструктуры компаунда в местах концентрации больших механических напряжений.

Проведенные исследования показали, что использование такого компаунда приводит к резкому уменьшению эффекта тренировки и позволяет при первом возбуждении магнита получить близкую к максимальной величину критического тока.

Вихревые кооперативные потери в кабеле новой конструкции при скоростях изменения магнитного поля $\dot{B}=4$ Тл/с практически отсутствуют, а общие тепловые потери определяются только характеристиками применяемых сверхпроводящих проволок.

Таблица 2

Апертура магнита	мм ²	92 x 42
Физическая длина магнита	мм	1486
Размеры железного ярма	мм ³	1400 x 256 x 166
Масса магнита	кг	360
Число витков обмотки		12
Индуктивность	мГн	0,635
Длина кабеля в обмотке	м	45
Диаметр трубки кабеля (мельхиоровой)	мм	5 x 0,5
Число СП проводов Ø0,5, НТ-50		31
Число СП нитей в проводе		1045
Диаметр СП нитей	мкм	10
Внешний диаметр кабеля с изоляцией	мм	~7
Критический ток магнита при T=4,35K	А	6470
запасенная энергия	кДж	13,3
Суммарная интегральная относительная неоднородность магнитного поля в апертуре на уровне B=2Тл		4 · 10 ⁻⁴
Общий теплоприток к гелию в магните при работе в трапецевидном цикле с периодом 2с, V _{max} = 2 Тл и V=4 Тл/с	Вт	11

Рис.3. Конструкция трубчатого сверхпроводящего кабеля для обмоток магнитов Нуклотрона. 1-мельхиоровая трубка, 2 - сверхпроводящий провод, 3 - бандаж из нихромовой проволоки, 4 - полиимидная лента (каптон), 5 - стеклолента, пропитанная эпоксидным компаундом, 6-эпоксидный компаунд.

Рассматриваемая конструкция сверхпроводящего кабеля отвечает поставленным задачам, технологична и проста в изготовлении, что позволило изготовить в условиях ЛВЭ весь сверхпроводящий кабель для магнитов Нуклотрона (около 12 км).

Полученные экспериментальные характеристики позволяют делать расчетную оценку энергетических потерь в обмотках магнитов Нуклотрона для разных режимов работы.

Для отработки технологии изготовления дипольных магнитов с обмоткой из бандажированного сверхпроводящего трубчатого кабеля новой конструкции, оценки затрат на их производство и получение экспериментальных характеристик 1981-1983 годах автором был создан полномасштабный дипольный магнит ЦСД-2 и проведены испытания двух модификаций этого магнита.

Конструкция магнита приведена на рис.3а. Основные характеристики в таблице 2.



Рис.3а

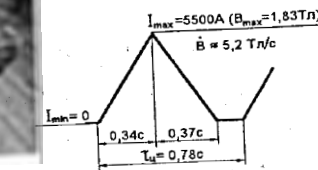


Рис.4

Исследования модифицированной конструкции магнита ЦСД-2М показали: тепловыделения в магните при работе в цикле по графику тока рис.4 составили ~ 32Вт, статический теплоприток к магниту ~ 1,5Вт, критический ток в магните при температуре 4,35К составил 6470А.

Магнит устойчиво работал при уменьшении расхода гелия до 0,40 г/с, при этом паросодержание потока гелия на выходе из обмотки составляло около 1, а на выходе из канала охлаждения магнитопровода выходил перегретый пар с температурой 6,8 К.

Результаты исследований энергетических потерь в магните (общие и в железном ярме) для двух скоростей изменения магнитного поля при различных временных параметрах стола тока приведены на рис.5.

Численное (проверочное) моделирование поля сверхпроводящего диполя ЦСД-2 и анализ нелинейных эффектов с целью оптимизации конструкций магнита в соответствии с требованиями, связанных с насыщением железного ярма и влиянием размеров изоляционных прокладок между обмоткой и магнитопроводом (корпусная изоляция) и влияние лобовых частей, проводился на основе метода объемных интегральных

во всем динамическом диапазоне изменения поля при ускорении, начиная с момента инжекции. Кроме заданных допусков на интегральные погрешности в однородности по длине магнитных элементов необходимо выдержать в пределах $5 \cdot 10^{-4}$ разбросы эффективных длин диполей и 10^{-3} квадрупольей, положения медианной плоскости в диполях и совпадение магнитной и геометрических осей квадруполья.

Подробные результаты математической обработки данных о спектре гармоник по тестовым измерениям магнитного поля магнитов Нуклотрона и предварительные оценки влияния реальных погрешностей поля на параметры циркулирующего пучка показали, что качество поля в магнитах соответствует требованиям устойчивости бетатронного движения частиц в ускорителе и это подтвердилось на практике при запуске ускорителя.

Кроме выполнения жестких допусков на однородность магнитного поля в элементах магнитной оптики ускорителя и др. существенным образом на динамику движения пучка в камере ускорителя сказывается точность пространственной установки магнитов в кольце.

Поскольку при создании магнитной системы не всегда по целому ряду обстоятельств удается выполнить все необходимые чрезвычайно высокие требования, то для их выполнения в магнитной системе Нуклотрона в малых линейных промежутках в едином блоке с квадрупольными магнитами расположено 28 сверхпроводящих мультипольных корректоров (МПК) с 3-мя и 4-мя типами обмоток в каждом. В МПК входят дипольные (прямые и косые), квадрупольные (прямые и косые), секступольные (прямые), октупольные (прямые) обмотки в различных сочетаниях. Каждая обмотка имеет индивидуальное электропитание, охлаждение – косвенное через изоляционные покрытия.

При серийном изготовлении одинаковых магнитов поле в них будет отличаться друг от друга за счет: ошибок в геометрических размерах окна (на всех уровнях поля) и внешних размеров магнитопровода (на высоких уровнях индукции поля при насыщении сердечника); ошибок в геометрических размерах длины магнитопровода; различной плотности упаковок пластин в магнитопровode (яре); различной магнитной

проницаемости отдельных пластин магнитопровода; неравномерной укладкой витков в основной обмотке возбуждения; разброса остаточных полей в железных магнитопроводах после намагничивания (влияние на уровне полей инжекции).

Из вышесказанного следует, что для создания хорошей магнитной системы синхротронного типа очень важно не только разработать отвечающую требованиям конструкцию магнитов, но и разработать соответствующую технологию серийного изготовления, чтобы получить магниты с достаточно идентичными характеристиками, которые определяются по данным тестовых магнитных измерений.

Конструкция дипольного магнита Нуклотрона приведены на рис.7, основные характеристики в таблице 4.

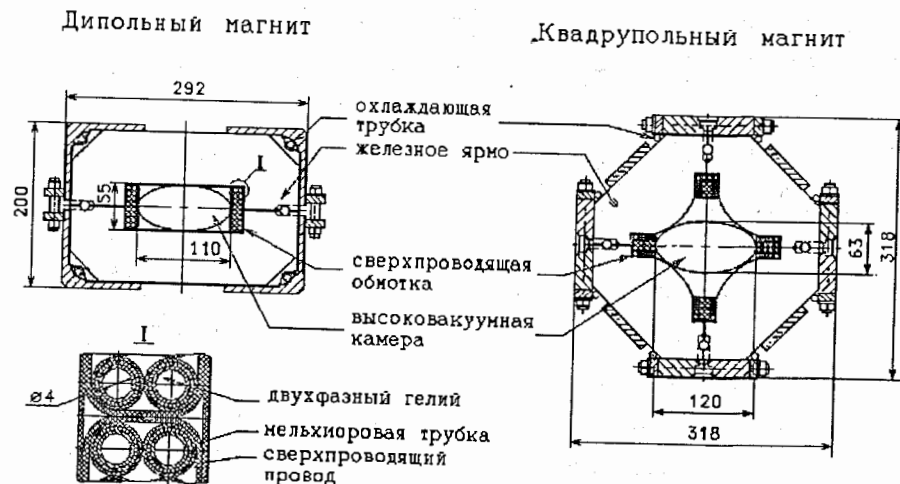


Рис.7

Магнит имеет разборную конструкцию. Основным силовым элементом конструкции магнита служит железное ярмо, которое воспринимает динамические усилия, возникающие при импульсном возбуждении обмотки магнита. Ярмо состоит из двух симметричных частей, состыкованных с помощью болтовых соединений.

Полуядро диполя набирается из штампованных пластин листовой электротехнической стали марки Э-330 толщиной 0,5 мм. По краям пакета располагаются торцевые пластины толщиной 25мм из стали марки Ст-3.

Таблица 4 Основные параметры структурных сверхпроводящих магнитов Нуклотрона

Параметры	Ед.изм.	Диполь	Квадруполь
Масса	кг	500	200
Конфигурация ярма		оконная рама	гиперболические полуса
Длина ярма (по железу)	мм	1370	430
Физическая длина	мм	1462	450
Апертура (гориз/вертик)	мм ²	110x55	120x63
Число витков в обмотке		2x8	4x5
Длина СП кабеля в обмотке	м	62	24
Максимальная индукция (при 6 кА)	Тл	1,98	—
Максимальный градиент поля (при 5,6 кА)	Тл/м	—	33,4
Индуктивность	мГн	1,1	0,44
Запасенная энергия	кДж	19,8	6,9
Динамические тепловыделения при $\dot{B}=2\text{Тл/с}$; $B_{\min}=0$; $B_{\max}=2\text{Тл}$; $f=0,5\text{Гц}$	Вт	21	—
Динамические тепловыделения при $G=33,4\text{Тл/м}\cdot\text{с}$; $G_{\min}=0$; $G_{\max}=33,4\text{Тл/м}$; $f=0,5\text{Гц}$	Вт	—	12
Статические теплопритоки	Вт	6,6	5,2

Для сборки полуярма был разработан специальный стапель.

После снятия полуярма со стапеля оно рихтовалось, проходило предварительную обработку на фрезерном станке и финишную доводку до окончательных размеров внутреннего полуокна с точностями по высоте 0,01 мм и ширине 0,05 мм; финишной обработке на шлифовальном станке в соответствии с заданными допусками подвергались также плоскости разъема магнитопровода и базовая поверхность.

Затем два полуярма собирались в единый магнитопровод и разрабатывались калиброванные отверстия под штифты. Завершается механообработка операцией фрезерования торцевых поверхностей собранного магнитопровода с доводкой размера магнитопровода по длине с точностью - 0,1 мм.

Двухрядная седлообразная обмотка состоит из двух симметричных по отношению к медианной плоскости полуобмоток, наматываемых отдельно на двух идентичных шаблонных приспособлениях и соединяющихся в единую форму после намотки.

На обмотку наносится слой общей корпусной изоляции из стеклотенты толщиной 0,1 мм, пропитанной эпоксидным компаундом. И только после этого обмотка обжимается до фиксированных размеров с точностью до 0,05 мм.

Для паспортизации магнитов они все прошли тестовые испытания для определения критического тока и замера интегральных нелинейностей поля в апертуре при работе в цикле со скоростью подъема и спада поля $\dot{B}=2\text{ Тл/с}$ при общей длительности цикла равной двум секундам.

В таблице 5 даны зависимости средних значений индукции магнитного поля и эффективной длины диполей от тока питания в диапазоне 640-6400 А.

Таблица 5. Токосые зависимости структурных элементов магнитной системы Нуклотрона, где W - энергия пучка, B_m - индукция в зазоре дипольного магнита, L_m - эффективная длина дипольного магнита, G_d - градиент магнитного поля квадрупольного магнита, L_d - эффективная длина квадрупольного магнита.

I(A)	W(МэВ/Н)	B_m (Тл)	L_m (М)	G_d (Тл/М)	L_d (м)
640	261.8	0.2267	1.4193	3.8832	0.4419
1280	829.1	0.4538	1.4200	7.7523	0.4413
1920	1499.9	0.6818	1.4198	11.6078	0.4412
2560	2207.5	0.9097	1.4191	15.4599	0.4411
3200	2930.9	1.1373	1.4175	19.2827	0.4407
3840	3660.5	1.3641	1.4145	23.0486	0.4402
4480	4378.9	1.5858	1.4094	26.6726	0.4381
5120	5056.7	1.7942	1.4036	30.1355	0.4378
5760	5665.3	1.9806	1.3972	33.1397	0.4352
6400	6102.6	2.1145	1.3954	35.1752	0.4333

На рис.8 приведено распределение числа дипольных магнитов Нуклотрона в зависимости от достигнутых при тренировке максимальных значений критического тока.

На рис.9 приведено распределение нормализованного к току 5,12 кА интегрального значения основной компоненты индукции магнитного поля в диполях Нуклотрона, характеризующее идентичность изготовления магнитов.

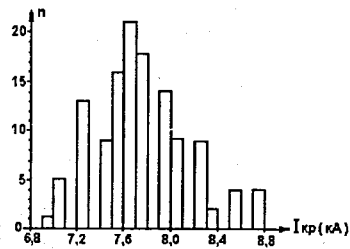


Рис.8

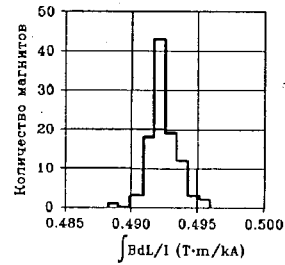


Рис.9

Результаты магнитных измерений показали, что среднеквадратичный разброс эффективных длин диполей $\langle L_M \rangle$ превышает систематическое значение L_M не более чем на 2,6мм, в диапазоне токов от 0 до 6,4 кА.

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно хорошей точности изготовления диполей в продольных и поперечных измерениях.

Оценка положения медианной плоскости магнитов показывает, что угол ее отклонения от геометрической плоскости не превышает $3,7 \cdot 10^{-4}$ рад.

Основное влияние на динамику пучка оказывают систематические нелинейности с $n = 2, 4, 6 \dots$ (см. рис.10).

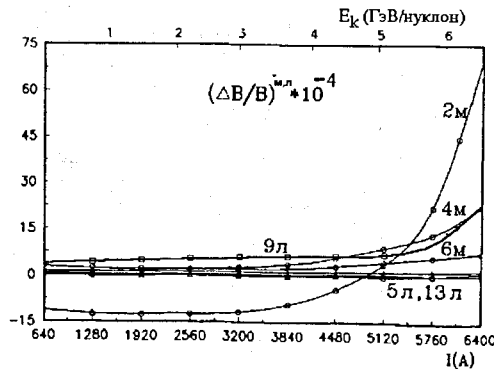


Рис.10 Зависимость систематических величин неоднородностей поля дипольных и квадрупольных магнитов Нуклотрона от тока и кинетической энергии на радиусе $R = 40$ мм, (изображение гармоник поля из разложения в ряд Тейлора).

Разброс интегральных значений остаточных магнитных полей в диполях по отношению к уровню поля при инжекции не превысил $\Delta B_{ост.} / B_{инж.} < 10^{-3}$ после возбуждения магнитов током 6500 А.

При размагничивании магнитов обратным током 650 А остаточное поле уменьшается примерно на порядок.

В качестве исходных параметров для расчета линз брался максимально необходимый градиент линзы $G=35T/m$ при максимальном рабочем токе не более 6 кА и эффективной длине не более $L_{эфф} = 42,5$ см в соответствии с длиной малого линейного промежутка регулярной магнитной структуры Нуклотрона.

На рис.7 представлены поперечное сечение квадрупольного магнита Нуклотрона с полюсами гиперболической формы, в таблице 4 основные параметры.

Ярмо линзы состоит из четырех симметричных частей.

Для серийного изготовления магнитопроводов линз регулярной магнитной структуры Нуклотрона были изготовлены высокоточные штампы. Пластины с необходимой конфигурацией полюса штамповались из электротехнической стали марки Э-330 А толщиной 0,5 мм.

По аналогии с диполем 1/4 магнитопровода собиралась из штампованных пластин, которые с помощью продольных фланцевых накладок и торцевых пластин из стали толщиной 20мм электросваркой соединялись в единую конструкцию полюса. Магнитопровод линзы с помощью болтовых фланцевых соединений собирался из 4-х полюсов на круглой направляющей. Затем на токарном станке обрабатывались торцевые поверхности полюсов, доводя продольный размер магнитопровода с точностью до 0,05 мм. Как и в диполе, полностью собранная обмотка возбуждения, намотанная на точных шаблонных устройствах, имеющая вид беличьей клетки, перед сборкой линзы закладывалась в пазы полюсов, зажимаясь последними в строго фиксированное положение.

Основные характеристики дипольных и квадрупольных магнитов приведены в таблице 4. По аналогии с информацией о характеристиках дипольного магнита на рис.10,11,12. приведены данные для квадрупольных магнитов Нуклотрона.

Криогенно-магнитная система Нуклотрона создается из одинаковых криогенно-магнитных модулей трех типов соответственно для дипольных, фокусирующих и дефокусирующих магнитов.

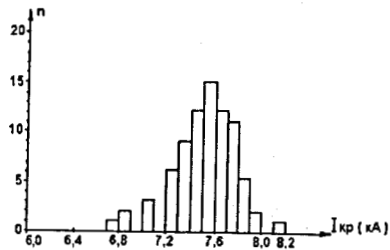


Рис.11 Распределение числа сверхпроводящих квадрупольных магнитов Нуклотрона по величине критического тока (серийное изготовление 68шт.)

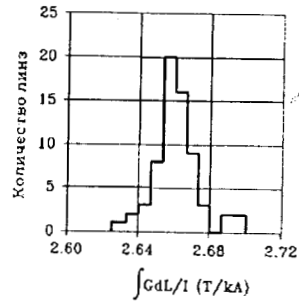


Рис.12 Распределение нормализованного интеграла градиента поля квадрупольного магнита Нуклотрона.

Каждый модуль перед установкой на кольцо ускорителя проходит комплексную проверку (гидравлическое сопротивление, электрическая прочность, магнитные измерения и др.) на специальных стендах. При сборке криогенно-магнитной системы с помощью разборных вакуумных соединений стыкуются (см. рис.13) гелиевые коллекторы 2, трубопроводы с жидким азотом 7, вакуумная камера 4 и разъемные муфты 5 вакуумного кожуха соседних блоков.

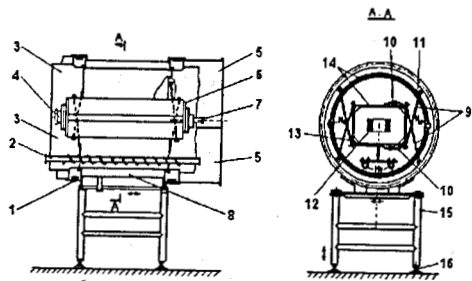


Рис.13 Схема криогенно-магнитного модуля. 1-сиффон; 2-гелиевые коллекторы; 3-тепловой экран; 4-вакуумная камера; 5-муфта; 6-ядро; 7-трубопровод с жидким азотом; 8- вакуумный кожух; 9-тяга; 10-СП-кабель электрической связи магнитов; 11-тепловой мост; 12-обмотка; 13-трубка для охлаждения ядра; 14-суперизоляция; 15-подставка; 16-домкрат.

Все магниты ускорителя соединяются по группам в три электрические цепи: отклоняющие магниты, фокусирующие и дефокусирующие магниты. В каждом модуле помимо электроцепи собственного магнита имеются транзитные кабели электрической связи магнитов других групп. Для электрического соединения соседних модулей в каждом промежутке между магнитами выполняются четыре электрических спая трубчатых СП-кабелей.

При этом все гелиевые каналы модуля соединены последовательно с гелиевыми коллекторами этого модуля и проверены на герметичность на стенде.

Такая технология соединения модулей позволяет с высокой степенью вероятности исключить гелиевые течи в вакуумное пространство, окружающее магниты до установки в кольцо ускорителя.

Общий вид криогенно-магнитных модулей дипольного и квадрупольного магнита Нуклотрона приведены соответственно на рис.15, 16.



Рис. 15 Общий вид криогенно-магнитного модуля дипольного магнита



Рис.16 Общий вид криогенно-магнитного модуля квадрупольного магнита

Схема криостатирования магнитов Нуклотрона приведена на рис.17. Состыкованные между собой криостаты модулей образуют один, общий для каждой половины кольца ускорителя, криостат.

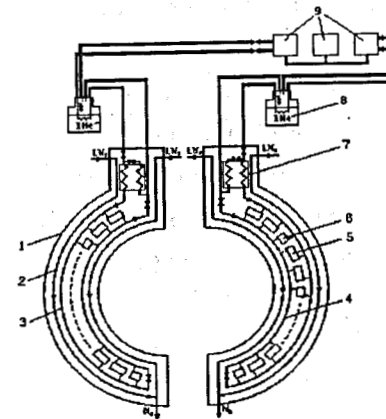


Рис.17 Схема криогенных систем Нуклотрона. 1 - вакуумный кожух, 2 - тепловой экран, 3 - питающий коллектор жидкого гелия, 4 - отводящий коллектор гелия, 5 - дипольный магнит, 6 - квадрупольная линза, 7 - спутниковый рефрижератор, 8 - сепаратор, 9 - рефрижератор /ожижитель гелия КГУ 1600/4,5.

Минимальное время охлаждения в сеансах работы 80-тонной криогенно-магнитной системы Нуклотрона от 300К до 4,5К составило 72 часа, а максимальное - 110 часов. Криостатирование магнитов устойчиво обеспечивается двумя гелиевыми рефрижераторами общей производительностью 3,2кВт на уровне 4,5К, работающими параллельно.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований и разработки системы эвакуации энергии из сверхпроводящей магнитной системы Нуклотрона при переходе магнитов в резистивное состояние.

Переход сверхпроводящей обмотки магнитов в резистивное состояние может быть вызван ухудшением условий криостатирования, превышением допустимого значения тока в обмотке, локальным нагревом сверхпроводящего кабеля обмотки из-за радиационных потерь и целого ряда других причин. При этом в обмотке возникает локальный участок с активным сопротивлением, на котором выделяется энергия в виде джоулева тепла от протекания тока возбуждения магнитной системы. Для предотвращения перегрева и разрушения сверхпроводящего кабеля обмотки необходимо быстро снизить до нуля ток возбуждения магнита. Наиболее простым способом является гашение поля при высадке энергии на внешнее активное сопротивление, который заключается в отключении источника электропитания (закорачивании выходных цепей и перевод источника питания в инверторный режим работы) и введения в цепь тока возбуждения сверхпроводящих магнитов активного сопротивления гашения поля (внешнего). При этом необходимо выбрать величину $R_{внеш}$ - сопротивление гашения поля такой, чтобы разогрев кабеля в месте появления нормальной зоны не приводил к его разрушению и чтобы напряжения на разных участках электроцепи магнита не превышали допустимых величин.

С целью определения зависимости температуры разогрева сверхпроводящего кабеля в районе нормальной зоны от максимальной величины напряжения эвакуации энергии на аварийном магните ($u = R_{внеш} i$) были проделаны исследования и выработаны рекомендации.

Исследования проводились на одиночном магните и на штатном дипольном магните Нуклотрона при испытаниях октанта магнитной системы

ускорителя в цепи, состоящей из 12 диполей и 4 квадрупольей, соединенных в единую цепь.

По осциллограммам напряжений с потенциальных концов, формы тока и индуктивной составляющей напряжения на магните были определены:

- скорость распространения нормальной зоны в обмотке диполя, которая не зависела от направления прокачки гелия и составила для значений тока в обмотке 3,5 и 6 кА соответственно 10, 15 и 20 м/с (точность измерений $\pm 5\%$);

- зависимость температуры разогрева кабеля на участке нормальной зоны, от величины напряжения на магните в момент начала эвакуации энергии, которая соответственно равнялась 170, 285 и 450 К при 38,5; 28,8; 23,2 вольтах.

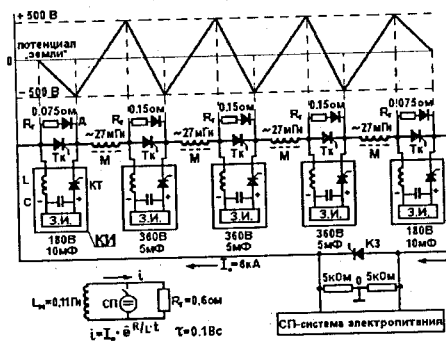


Рис.18 Схема эвакуации энергии из дипольных магнитов Нуклотрона и ее эквивалентная схема:

Тк - тиристорный ключ; Д - диод;
 З.И. - зарядный источник;
 М - цепочка дипольных магнитов;
 КИ - импульсный источник коммутации тока; КЗ - тиристорный короткозамыкатель;
 КТ - коммутационный тиристор;
 С - коммутационная емкость;
 L - реактор; R - сопротивление гашения поля.

Полученные в эксперименте данные позволили сделать вывод, что для обеспечения эффективной защиты необходимо, чтобы напряжение на одном магните в момент начала эвакуации было порядка ~ 40 В и ~ 4 кВ на всей цепи дипольных магнитов.

Принципиальная схема системы эвакуации энергии магнитного поля дипольных магнитов Нуклотрона приведена на рис.18.

В этой схеме при работе импульсных коммутационных источников - КИ и во время эвакуации энергии потенциалы различных участков цепи магнитов относительно "земли" не превышают ± 500 В при токе эвакуации - 6 кА.

Эвакуация энергии из квадрупольных магнитов осуществляется с помощью 2х-тиристорных ключей, так как суммарная запасенная энергия в линзах примерно в 4 раза меньше.

На рис.19 изображена зависимость от времени активной составляющей напряжения нормальной зоны в обмотке дипольного магнита, полученной из данных эксперимента при токе на момент начала эвакуации равным 6 кА.

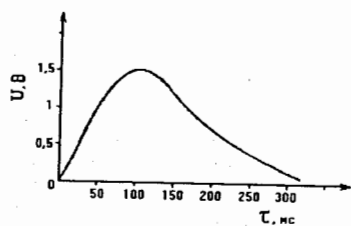


Рис.19

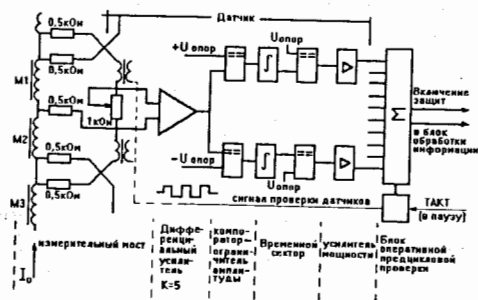


Рис. 20 Блок схема датчика обнаружения перехода магнита в резистивное состояние (для двух магнитов).

Для предотвращения аварийного разрушения сверхпроводящего кабеля обмотки от перегрева необходимо как можно раньше зафиксировать момент перехода магнита в резистивное состояние. С этой целью с мест спая обмоток магнитов выводятся потенциальные провода, через резисторы - 500 Ом. (для предотвращения их пережигания при замыкании). Как показано на рис.20 к ним подключаются входные цепи датчиков обнаружения нормальной фазы, образуя мостовую схему. При появлении нормальной зоны в обмотке одного из магнитов в диагонали моста появляются сигналы рассогласования, которые усиливаются и преобразуются в командный сигнал и включают схему эвакуации энергии. Для отстройки от помех в датчике предусмотрена амплитудная и временная селекция. На включение защит проходят сигналы на входе датчиков, имеющие амплитуду более 50 мВ и длительность более 3 мс (уровень помех до 20-30 мВ). В паузах между циклами работы ускорителя датчики тестируются на исправность.

Системой таких датчиков охватываются все сверхпроводящие цепи от токоввода до токоввода. Имеется вторая система, так называемых "групповых датчиков", в которых плечи моста состоят из нескольких магнитов.

Глава пятая посвящена вопросам применения модифицированного трубчатого сверхпроводящего кабеля в элементах магнитной оптики каналов транспортировки частиц.

Как известно ускорительно-накопительные комплексы имеют разветвленную систему каналов транспортировки частиц. При одновременном проведении на синхрофазотроне ОИЯИ в одном ускорительном цикле нескольких физических экспериментов - потребление энергии системами электропитания элементов магнитной оптики каналов из сети делается соизмеримым с потреблением энергии собственно ускорителем и доходит до величины 8÷10 Мвт потребляемой мощности. Актуальная потребность в десятки раз снизить энергопотребление привела к необходимости рассмотрения вопроса расширения области применения магнитов типа "Дубна" с трубчатыми сверхпроводящими обмотками простых в изготовлении, удобных в эксплуатации и дешевых по стоимости.

Однако, большой ток возбуждения отдельно запитываемых магнитов в каналах экономически невыгоден. При индивидуальной подстройке токов возбуждения множества элементов магнитной оптики каналов привело бы к введению большого количества сильноточных токовводов, для охлаждения которых потребуются большие криогенные мощности. Сами магниты, работая в постоянно-точном режиме, практически не выделяют тепло. Необходимо только снять хладагентом статические теплопритоки по подвескам, (опорам), от тепловой радиации и радиационного разогрева пучком, которые в сумме значительно меньше тепловыделений в сильноточных токовводах. Практический опыт создания и исследований режимов работы первых образцов магнитов с небольшими токами возбуждения с обмотками из сверхпроводящего кабеля трубчатого типа, на примере сверхпроводящего инфлекторного септум-магнита Нуклотрона, показал на экономическую эффективность и перспективность применения

этих устройств. Для обмоток этого магнита был изготовлен трубчатый кабель в модифицированном варианте с электрически изолированными сверхпроводящими проводниками.

Изготовление 10 витковой седлообразной обмотки септум-магнита осуществлялось по технологии изготовления обмоток штатных магнитов Нуклотрона на шаблонных устройствах. Выводные концы кабеля обмотки сводились вместе и затем провода в кабеле обмотки соединялись последовательно пропаянной скруткой (ПОС-60), образуя 300 витковую обмотку возбуждения с номинальным током 200±250 А. При этом провода начала и конца такой многовитковой обмотки разделялись капроновой леской, заложенной в кабеле при его изготовлении (между ними наибольшее напряжение при эвакуации энергии).

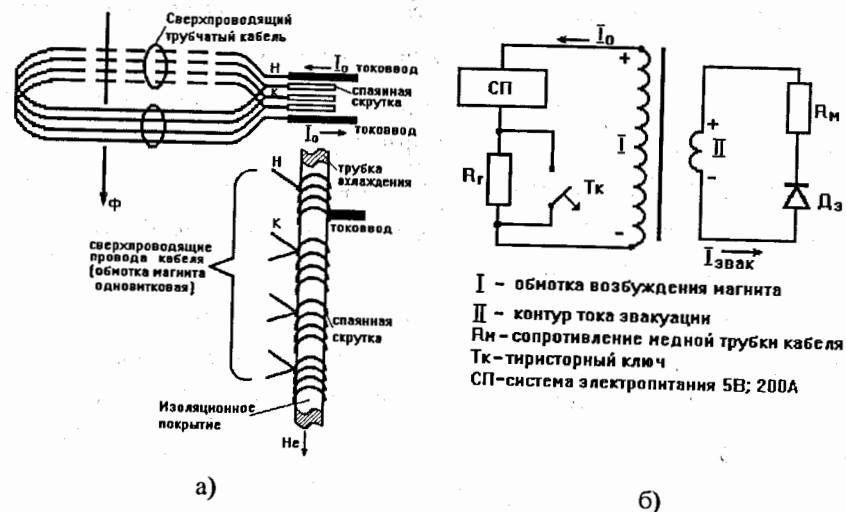


Рис. 21

Для охлаждения сверхпроводящих проводов в местах спая скрутка наматывалась на изолированную полиимидной лентой трубку охлаждения кабеля и прижималась изоляционным ленточным покрытием (см.рис. 21а, на иллюстрации изображена одновитковая обмотка). В этой конструкции обмотки сверхпроводящие токонесущие провода охлаждаются косвенно через изоляционные покрытия, трубка кабеля для прокачки гелия электрически изолирована от сверхпроводящих проводов. По известной

схеме из нее можно организовать на момент эвакуации энергии электрическую цепь, в которой равномерно по длине кабеля можно рассеять всю запасенную энергию магнитного поля путем быстрой коммутации тока в медную трубку. (см.рис. 21б). Опыт испытаний и успешная эксплуатация в сеансах работы Нуклотрона убедительно подтвердили состоятельность рассматриваемой концепции и созданных конструкций магнитов, работающих в постоянно-точных режимах с малыми токами возбуждения. На этом принципе были сделаны и испытаны на стенде квадрупольные и секступольные линзы для системы медленного вывода пучка из Нуклотрона, создаваемого в настоящее время.

Для возбуждения магнитов с новой технологией требуются источники электропитания малой мощности ~1 кВт (5В, 200 А).

Новая технология в корне меняет подход к энергетике каналов транспортировки частиц ускорительных комплексов высоких и сверхвысоких энергий.

По оценкам автора, предложенный вариант слаботочных сверхпроводящих магнитов для каналов транспортировки частиц в ускорительных сверхпроводящих комплексах является весьма перспективным и экономически эффективным.

Основные результаты диссертационной работы.

1. Создано новое направление в разработке сверхпроводящих магнитных систем ускорителей синхротронного типа на основе предложенных новых конструкций электромагнитов, магнитное поле в рабочей апертуре которых формируется магнитопроводом, а обмотка возбуждения выполнена из трубчатого сверхпроводящего кабеля, специально разработанного для этих целей. Конструкция магнитов позволила применить выгодный и эффективный способ охлаждения, основанный на циркуляции двухфазного гелия по каналам кабеля обмоток и трубкам охлаждения магнитопроводов магнитов, подключенных параллельно к сборным коллекторам (питающий и отводящий).

Важным отличительным признаком ускорителя со сверхпроводящей магнитной системой нового типа является его способность работать с длительностью рабочего цикла в единицы секунд и иметь нижний предел

динамического рабочего диапазона изменения индукций магнитного поля при ускорении частиц $\sim 0,02$ Тл (понижение энергии инжектируемых частиц).

2. Предложен, разработан, исследован и реализован в обмотках магнитов Нуклотрона трубчатый сверхпроводящий кабель на основе выпускаемых промышленностью компонент, для работы в импульсных магнитных полях на рабочий ток 6 кА с малыми тепловыделениями ($0,15 \div 0,2$ Вт/м длины кабеля), при скоростях изменения поля порядка ~ 4 Тл/с, с радиусом изгиба до 20 мм.

3. Предложены, разработаны, исследованы и реализованы в магнитной системе Нуклотрона отклоняющиеся и фокусирующие сверхпроводящие электромагниты с максимальными уровнями индукции магнитных полей до $1,8 \div 2$ Тл, работающие с рекордной частотой циклирования для сверхпроводящих систем до 1 Гц.

4. Разработан и реализован проект магнито-криостатной системы ускорителя релятивистских ядер Нуклотрона - новой базовой установки ОИЯИ, введенной в действие в 1993 году, расширяющей возможности исследований в области релятивистской ядерной физики.

Проведено одиннадцать сеансов работы по наладке магнитной системы Нуклотрона и освоению ускорителя в физических экспериментах общей продолжительностью ~ 2600 часов. В соответствии с программой первых физических экспериментов с внутренними мишенями на ускоренных пучках Нуклотрона осуществлены режимы работы с уровнями индукции магнитных полей до 12 кГс и длительность ^ю столбов поля до 10с.

5. Проведены исследования процессов образования нормальной зоны в трубчатом сверхпроводящем кабеле обмоток магнитов нового типа при переходе в резистивное состояние. Выбраны необходимые параметры схемы эвакуации энергии и датчиков обнаружения в магнитах Нуклотрона зарождения резистивной (нормальной) зоны. Предложены, разработаны и реализованы системы аварийной эвакуации энергии из магнитной системы Нуклотрона, комплекс устройств датчиков перехода и отображения информации. Разработана и реализована общая схема взаимодействия защит магнитной системы Нуклотрона и систем электропитания.

6. Разработана и реализована схема соединений электроцепей функциональных групп сверхпроводящих магнитов Нуклотрона. Сформулированы требования и предложены схемные решения систем электропитания групп магнитов Нуклотрона. Выработаны требования, логика защит и конкретные технические решения по защитам, реализованные в системах электропитания функциональных групп магнитов Нуклотрона.

7. Разработана экономически эффективная концепция и предложены необходимые при ее реализации технические решения для создания сверхпроводящих элементов магнитной оптики каналов транспортировки частиц ускорителей с малыми постоянными токами возбуждения (~ 200 А) на основе и принципе действия магнитов Нуклотрона. Разработана и реализована конструкция трубчатого сверхпроводящего кабеля с электрически изолированными сверхпроводящими проводниками (по типу кабеля Нуклотрона), которые при изготовлении обмотки соединяются последовательно, образуя многовитковую обмотку магнита. Конструкция реализована в инфлекторном септум-магните Нуклотрона и вспомогательных линзах устройства медленного вывода пучков Нуклотрона.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А.М.Балдин...А.А.Смирнов и др. "Перспективы исследований по релятивистской ядерной физике в ЛВЭ ОИЯИ". Сообщение ОИЯИ, 9-7148, 1973 г.
2. Л.Н.Беляев, А.А.Смирнов и др. "Устройство для релейной защиты блока питания электромагнита". Авторское свидетельство СССР N 261581.. Бюллетень О.И. N 5, 1970 г.
3. А.М.Балдин,..., А.А.Смирнов и др. "Нуклотрон - ускорительный комплекс релятивистских ядер в ЛВЭ ОИЯИ". Труды четвертого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1974 г. Том II, стр.4-8.
4. N.N.Agapov, E.I.Dyachkov, H.G.Khodzhibagiyan, ..., A.A.Smirnov et al. "A pulsed dipole magnet made from a hollow composite superconductor with a circulatory refrigeration system". Cryogenics, V-20, N6, p.345-348 1980 (препринт ОИЯИ, P8-12786, 1979).

5. A.A.Smirnov, A.M.Baldin, ..., H.G.Khodzhibagiyani et al. "A pulsed superconducting dipole magnet". Journal de Physique, 1984, T.45, Coll.C1, suppl. N1, pp.C1-279-C1-282 (Препринт ОИЯИ 9-83-625, Дубна 1983).
6. Е.И.Дьячков, А.Г.Зельдович, А.А.Смирнов, Г.Г.Ходжибагиан. "Криостатирование импульсных сверхпроводящих магнитов с параллельным питанием обмоток двухфазным гелием". Сообщение ОИЯИ, 8-82-169, Дубна, 1982 г.
7. Л.Н.Зайцев, А.А.Смирнов, В.И.Смирнов. "Сверхпроводящий кабель для магнитных элементов ускорителей". Авторское свидетельство СССР, № 1424609, 1986 г.
8. Н.Г.Анищенко, И.Е.Карпунина, А.А.Смирнов, Ю.А.Шишов. "Электрическая изоляция обмоток сверхпроводящих магнитов для физики высоких энергий". "Физика элементарных частиц и атомного ядра, 1988 г, том 19, вып.3, стр.669-692.
9. В.М.Дробин, Е.И.Дьячков, ..., А.А.Смирнов и др. "Потери в сверхпроводящих кабелях в импульсных магнитных полях". Сообщение ОИЯИ Р8-80-575, Дубна, 1980 г.
10. З.В.Борисовская, А.М.Донягин, А.А.Смирнов, И.А.Шелаев. "Исследование нелинейностей магнитного поля сверхпроводящего диполя Нуклотрона". Сообщение ОИЯИ 9-86-714, Дубна, 1986 г.
11. А.М.Baldin, ..., А.А.Smirnov et al. "Nuclotron Status Report". IEEE Transaction on Nuclear Science. Vol.NS-30, N 4, 1983, pp. 3247-3249.
12. А.М.Донягин, А.Д.Коваленко, О.С.Козлов, В.А.Михайлов, А.А.Смирнов. "Анализ результатов магнитных измерений дипольных и квадрупольных магнитов Нуклотрона", Сообщение ОИЯИ Р9-94-329, Дубна, 1994 г.
13. А.М.Балдин, ..., А.А.Смирнов и др. "Сверхпроводящие мультипольные корректорные магниты для Нуклотрона". Сообщение ОИЯИ Р9-95-260, Дубна, 1995 г.
14. А.М.Baldin, ..., А.А.Smirnov et al. "Superconducting Fast Cycling Magnets of the Nuclotron". IEEE Transactions on Applied Superconductivity. Vol.5, N 2, part I, p.875-877, 1995.
15. А.М.Донягин, ..., А.А.Смирнов et al. "Preliminary analysis of the Nuclotron magnetic field". Proceeding's of the 5th European Particle Accelerator Conference, vol.3, p.2281-2283, 1996, Sitges (Barcelona).
16. П.Г.Васильев, А.М.Донягин, ..., А.А.Смирнов и др. "Измерение неоднородности поля в условиях импульсного нагрева обмотки сверхпроводящего магнита". Сообщение ОИЯИ Р9-83-394, Дубна, 1983 г.
17. З.В.Борисовская, Е.П.Жидков, А.А.Смирнов, Л.А.Смирнова, И.А.Шелаев. "Численное моделирование магнитного поля сверхпроводящих квадруполов для Нуклотрона". Сообщение ОИЯИ 9-88-25, Дубна, 1988 г.
18. А.А.Смирнов, Г.Г.Ходжибагиан. "Концепция сверхпроводящей магнитной системы Нуклотрона". Сообщение ОИЯИ 9-88-344, Дубна, 1988 г.
19. А.М.Baldin, N.N.Agapov, ..., H.G.Khodzhibagiyani, ..., А.А.Smirnov et al. "Cryogenic system of the Nuclotron a new superconducting Synchrotron". Препринт ОИЯИ Е9-93-273, Дубна, 1993 г.
20. А.М.Baldin, N.N.Agapov, ..., А.А.Smirnov et al. "Cryogenics of the new superconducting accelerator Nuclotron. The first year under operation". Сообщение ОИЯИ, Е8-95-65, 1995.
21. Е.И.Дьячков, ..., А.А.Смирнов и др. "К вопросу об эвакуации энергии из магнитов Нуклотрона". Сообщение ОИЯИ 9-89-467, Дубна, 1989 г.
22. Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, А.А.Смирнов. "К вопросу форсировки магнитного поля в режиме двухэтапного ускорения ядер на синхрофазотроне ОИЯИ". Журнал технической физики, Том XLV, в.2, стр. 337-341, 1975 г. Изд-во "Наука", Ленинград.
23. А.А.Смирнов. "Система возбуждения электромагнита протонного синхротрона". Авторское свидетельство № 468592, 1973 г.
24. П.Г.Акишин, ..., А.А.Смирнов, ..., В.И.Черников и др. "СП-инфлекторный магнит Нуклотрона". Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Том 2, стр.239-244, Дубна, Москва, 1990 г.
25. А.М.Балдин, Е.И.Дьячков, ..., А.А.Смирнов, ..., Г.Г.Ходжибагиан и др. "Стенд для исследования импульсных сверхпроводящих магнитов. Испытания на нем дипольного магнита СПД-2". Труды пятого

- Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Том II, стр.63-66, Дубна, 1976 г.
26. Ф.Хованец, Е.И.Дьячков,....,А.А.Смирнов и др. "Система для измерения потерь энергии в импульсных сверхпроводящих магнитах". Сообщение ОИЯИ 8-9918, Дубна, 1976 г.
 27. П.Г.Васильев, А.М.Донягин,...., А.А.Смирнов и др. "Измерение неоднородности поля в условиях импульсного нагрева обмотки сверхпроводящего магнита".Сообщение ОИЯИ P9-83-394, Дубна,1983 г.
 28. В.И.Деев, Л.Н.Зайцев,...., А.А.Смирнов и др. "Исследование радиационного-стойкого магнита Нуклотрона". Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Том II, стр.379-381, Дубна, 1988 г.
 29. С.А.Аверичев,...., А.А.Смирнов,...., Черников В.И. и др. "Состояние работ по Нуклотрону". Труды XIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Том I, стр.107-111, Дубна, 1992 г.
 30. А.М.Baldin, А.Д.Kovalenko,...., А.А.Smirnov et al. "How a 100TeV Synchrotron/Collider Based on the Nuclotron-Type Cryomagnetic System Would Look". Proceeding's of the 5th European Particle Accelerator Conference, vol.1, p.410-412, Sitges (Barcelona) 1996. (Препринт ОИЯИ E9-96-343, Дубна, 1996).
 31. С.А. Аверичев, А.В.Бычков, ..., И.Е.Карпунина, Е.К.Курятников, ..., А.А.Смирнов, А.Ю.Стариков и др. "Технология изготовления сверхпроводящих обмоток элементов магнитной оптики Нуклотрона". Труды XIV Совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино. 1994 г. Том 4, стр 83-88.
 32. А.М.Донягин, А.Д.Коваленко, О.С.Козлов, В.А.Михайлов, А.А.Смирнов. "Анализ результатов магнитных измерений дипольных и квадрупольных магнитов Нуклотрона". Труды XIV Совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино. 1994 г. Том 4, стр 77-82.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 июля 1997 года.