

УДК 621.384.63

НУКЛОТРОН — НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СИНХРОТРОНА

А.А.Смирнов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТ	96
МОДЕЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ДИПОЛЬ ЦСД-1	102
СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ТРУБЧАТЫЙ КАБЕЛЬ ДЛЯ БЫСТРО- ЦИКЛИРУЮЩИХ МАГНИТОВ НУКЛОТРОНА	105
МОДЕЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ПОЛНОМАСШТАБ- НЫЙ ДИПОЛЬ ЦСД-2	108
КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА СВЕРХПРОВОДЯ- ЩИХ МАГНИТОВ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТИПА	111
ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ НУКЛО- ТРОНА	113
ДИПОЛЬНЫЙ МАГНИТ. КОНСТРУКЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ХА- РАКТЕРИСТИКИ	120
КВАДРУПОЛЬНЫЙ МАГНИТ. КОНСТРУКЦИЯ И ОСНОВ- НЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	124
КРИОГЕННО-МАГНИТНЫЙ МОДУЛЬ И ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ КРИОГЕННО-МАГНИТОЙ СИСТЕМЫ	127
КРИОСТАТИРОВАНИЕ МАГНИТОВ	131
ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ЭВАКУАЦИИ ЭНЕРГИИ ИЗ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТ- НОЙ СИСТЕМЫ НУКЛОТРОНА В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ	132
ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ТРУБЧАТОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КАБЕЛЯ В ЭЛЕМЕНТАХ МАГНИТ- НОЙ ОПТИКИ КАНАЛОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЧАСТИЦ	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	141

УДК 621.384.63

НУКЛОТРОН — НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СИНХРОТРОНА

А.А.Смирнов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В обзоре приводятся основные результаты пионерских работ, выполненных в период с 1978 по 1999 г. на основе предложенных автором технических решений, и данные, полученные при испытании новых по типу моделей сверхпроводящих элементов магнитной оптики синхротронов, определивших практическую возможность создания нуклотрона — первого в России действующего сверхпроводящего ускорителя для получения пучков релятивистских ядер с энергией до 6 ГэВ/нуклон. Новая технология, использованная в нуклотроне, решает проблему принципиального упрощения конструкций сверхпроводящих магнитных систем ускорителей и каналов транспортировки частиц, удешевляет их стоимость и создает удобства при эксплуатации.

Fundamental results obtained on the basis of the author's novel technical solutions in 1978–1999 are described. Experimental data on the tests of a new type of superconducting magnets for particle accelerators are given. The elements of the synchrotron magnetic optics have determined practical opportunity of constructing the Nuclotron, which is the first operating superconducting accelerator in Russia. This accelerator is intended to provide beams relativistic particles with energies up to 6 GeV/n. The new technology used in the Nuclotron allows one to cardinaly simplify the design of superconducting magnet systems of accelerators and channels for particle transportation. The new magnets are very easy-to-use and have a low cost.

1. ВВЕДЕНИЕ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТ

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.

Создание системы медленного вывода, ускорение уникальных пучков релятивистских ядер с энергией 4 ГэВ/нуклон, поляризованных дейтронов и монохроматических нейтронов, сооружение нового экспериментального павильона с разветвленной системой каналов транспортировки частиц создали хорошие предпосылки для проведения фундаментальных исследований для физиков стран-участниц ОИЯИ.

В Лаборатории высоких энергий ОИЯИ под руководством академика А.М.Балдина развивается новое научное направление — релятивистская ядер-

ная физика, то есть физика явлений, в которых важную роль играют много-баррионные системы, движущиеся со скоростями, близкими к скорости света, физика множественных процессов, в которых не только в конечном, но и в начальном состоянии (зарождение реакции) присутствуют много частиц и др. 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 [1]. Однако 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 ввиду 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. В этой гонке инженеры и ученые из Национальной лаборатории им. Ферми (США) первыми построили и запустили сверхпроводящую магнитную систему синхротронного типа «Тэватрон» в тоннеле имеющегося «теплого» ускорителя на энергию 500 ГэВ, используемого в этом проекте как предускоритель (инжектор), и удвоили конечную энергию ускоряемых протонов до 1 ТэВ. Сверхпроводящие магниты этого ускорителя в несколько модернизированном виде с холодным магнитопроводом были применены в проектах других ускорителей и получили название магнитов типа « $\cos \theta$ » (УНК, DESY HERA, LHC, SSC, RHIC).

Максимальная величина индукции магнитного поля в этих магнитах (в зависимости от температуры криостатирования) лежит в диапазоне 3,5 ÷ 8 Тл. Поле в них формируется с помощью многovitковой, как правило, двухслойной обмотки из сверхпроводящего кабеля типа «плоская скрутка», сжатой бандажирующими воротниками и окруженной шихтованным магнитным экраном. Двухслойная обмотка типа «стадион» изготавливается на прецизионном оборудовании, ее геометрические размеры определяют однородность магнитного поля в апертуре магнита. Криостатирование осуществляется потоком жидкого гелия внутри гелиевого сосуда с магнитами, а также потоком двухфазного гелия для охлаждения этого сосуда. Витковая электроизоляция обмотки находится на пути теплового потока от сверхпроводника к гелию, что приводит к большой деградации критического тока в магните при больших скоростях изменения магнитного поля в нем. Охлаждение магнитов осуществляется последовательно, затраты времени на захолаживание магнитной системы от комнатной до рабочей температуры измеряются неделями.

Таким образом, вместе с криостатом, подвеской (опорами) и гелиевым сосудом создана чрезвычайно сложная по технологии изготовления, дорогостоящая и металлоемкая конструкция криогенно-магнитной системы с очень сложной системой эвакуации энергии в аварийных режимах.

В период с 1973 по 1975 гг. в ЛВЭ ОИЯИ по инициативе А.М.Балдина также началась разработка сверхпроводящего жесткофокусирующего ускорителя релятивистских ядер — нуклотрона — с ориентировкой на сверхпроводящие магниты с максимальными уровнями полей ~ 5 Тл типа « $\cos \theta$ » 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 [2].

Рабочий цикл бустера предполагался длительностью 1 с, энергия ускоренных ядер в теплом кольце 500 МэВ/нуклон (более поздний вариант с цикличностью 3 Гц и энергией 800 МэВ).

Это был неоправданно дорогой проект, не учитывающий финансовые возможности ЛВЭ и ОИЯИ, с расчетом на изготовление магнитной системы нуклотрона в промышленности, с чрезвычайно сложной технологией изготовления сверхпроводящих магнитов и, в общем, не решавший до конца задачу существенного развития ускорительного комплекса ЛВЭ, отвечающего прогнозируемому уровню других мировых центров и перспективным программам физических исследований.

По этой причине в период 1975–1979 гг. в ЛВЭ ОИЯИ начались поиски новой концепции нуклотрона и появилось направление, базирующееся на простых в изготовлении, недорогих сверхпроводящих магнитных системах для синхротронов с уровнями 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, получивших название — магниты типа нуклотрон, ориентированных на серийное изготовление в условиях Опытного производства ОИЯИ.

В период 1980–1983 гг. создаются и всесторонне исследуются первые образцы гибридных полномасштабных дипольных магнитов нуклотрона с обмоткой из разработанного в ЛВЭ трубчатого сверхпроводящего кабеля для работы в импульсных магнитных полях.

На основе полученных при испытаниях этих магнитов данных сделано убедительное обоснование возможности создания однокаскадного нуклотрона с конечной энергией ускоренных ядер ~ 6 ГэВ/нуклон, работающего с частотой циклирования $0,5 \div 1$ Гц. В этом варианте на первой стадии модернизации ускорительного комплекса нуклотрону отводится роль основного инструмента

в проведении физических экспериментов, на второй — добавляется функция инжектора для ускорителя с более высокой энергией ускоряемых ядер.

Для выхода в асимптотическую область энергий релятивистских ядер (значительно выше 6 ГэВ) необходимо существенное развитие ускорительного комплекса ЛВЭ, отвечающего 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. на магнитах нового типа [3].

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 г., первого действующего сверхпроводящего ускорителя в России.

В соответствии с программой создания нуклотрона в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ автором обзора было предложено коренным образом упростить криогенно-магнитную систему этого ускорителя, введя 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) [4].

Успешные испытания первой модели, проведенные исследования по определению основных характеристик нашли свое продолжение в проекте «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 технологии изготовления трубчатого сверхпроводящего кабеля для работы в импульсных магнитных полях, создание полномасштабного модельного магнита дипольного типа ЦСД-2, измерение основных параметров, определение энергетических потерь и условий криостатирования [5].

Вторая очередь проекта предусматривала разработку штатных дипольных и квадрупольных магнитов нуклотрона, модульной криогенно-магнитной системы нуклотрона, отработку технологии серийного производства и испытаний.

Конечной целью второй очереди (1985–1988) проекта была опытная сборка и испытания суперпериода криогенно-магнитной 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 г. был утвержден проект «Реконструкция магнитной системы синхрофазотрона на сверхпроводящую — нуклотрон» (том 2, рабочий проект РП-02-02, раздел «Магнитная система. Система электропитания»), предусматривающий создание нуклотрона. Автор обзора был научно-техническим руководителем работ по созданию и реализации этих проектов, проведения исследований и испытаний, непосредственным разработчиком основных концептуальных положений, конструктивных решений и технологий.

В период с 1988 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.

Захлаживание 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 ($\sim 2 \cdot 10^5$ циклов возбуждения). Перепад давления между питающим и отводящим гелиевыми коллекторами поддерживался равным 9 кПа. При этом массовое паросодержание гелия в отводящем коллекторе ~ 1 , а его температура 4,5 К. Криостатирование и работа магнитов были стабильными. 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 ядра магнитов выходил перегретый пар с температурой от 5,1 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 17 сеансов работы нуклотрона общей продолжительностью 3400 часов, из них на проведение физических экспериментов с пучками нуклотрона, взаимодействующими с внутренними мишенями в вакуумной камере ускорителя, было затрачено примерно $65 \div 70\%$ времени. В 16-м и 17-м сеансах проводились работы по отладке медленного вывода пучка из нуклотрона в экспериментальный павильон и ставились первые эксперименты на выведенном пучке.

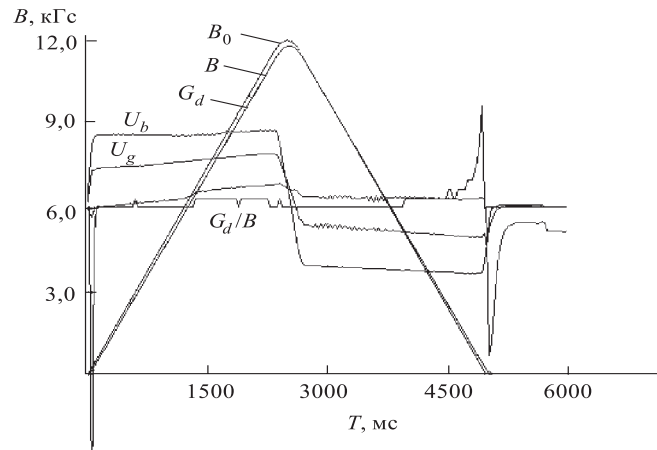


Рис. 1. Основные параметры магнитного цикла нуклотрона в наладочном сеансе работы: $B = 12$ кГс, $T = 10$ мс, $B_{\max} = 12$ кГс, период цикла 10 с, $dB/dt = 5$ кГс/с

На рис.1 приведены основные параметры магнитного цикла нуклотрона в одном из наладочных сеансов работы: B_0 — график опорной функции индукции магнитного поля дипольных магнитов; B — график изменения индукции магнитного поля дипольных магнитов; G_d — график изменения градиента квадрупольных магнитов (дефокусирующих); U_b — контрольная картина изменения выходного напряжения системы питания дипольных магнитов; U_g — выходное напряжение системы питания квадрупольных маг-

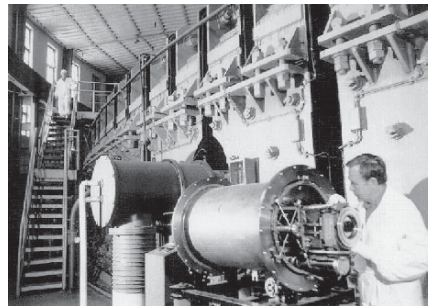


Рис. 2. Общий вид магнитной системы синхрофазотрона ОИЯИ и модуля дипольного магнита криогенно-магнитной системы нуклотрона

нитов; G_d/B — изменение коэффициента отношения градиента в линзах к индукции магнитного поля в диполях (правая шкала масштабов).

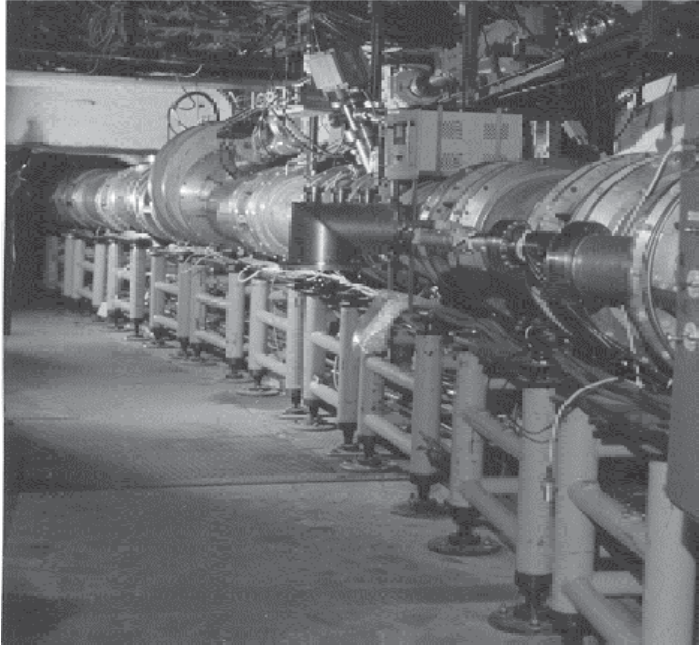


Рис. 3. Общий вид кольца криогенно-магнитной системы нуклотрона в районе канала инъекции

Для источника питания квадрупольных магнитов в качестве опорной функции используется сигнал изменения индукции магнитного поля в измерительном дипольном магните — МИ (см. рис. 27).

Для наглядного сравнения на рис. 2 приводится общий вид магнитной системы синхрофазотрона ОИЯИ и криогенно-магнитного модуля дипольного магнита нуклотрона, на рис. 3 — общий вид кольца нуклотрона в туннеле, созданного в соответствии с планами модернизации ускорительного комплекса ЛВЭ ОИЯИ [6,7].

2. МОДЕЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ДИПОЛЬ ЦСД-1

Общий вид и конструкция магнита ЦСД-1 показаны на рис. 4. Основным силовым элементом конструкции диполя типа «оконная рама» служит железное ярмо. Ярмо состоит из двух симметричных частей, изготовленных из штампованных пластин электротехнической стали марки Э-330А толщиной

0,5 мм, двух торцевых накладок и двух продольных уголков из стали марки СТ-3, соединенных с помощью электросварочных швов в единую конструкцию полуярма.

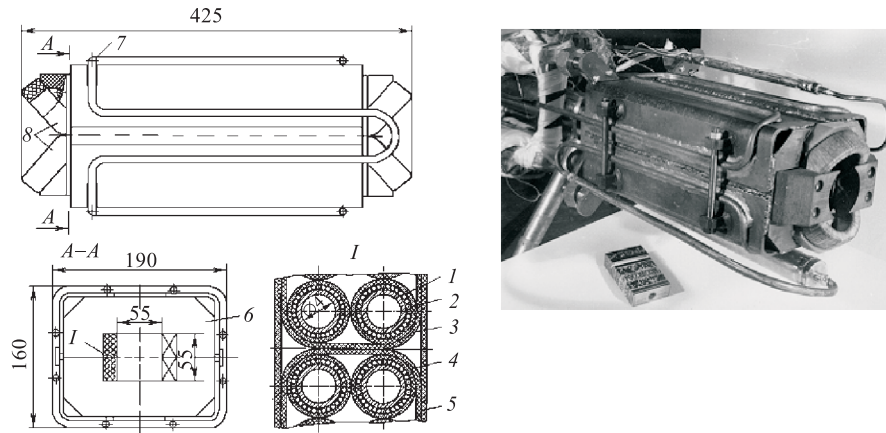


Рис. 4. Конструкция магнита ЦСД-1: 1 — мельхиоровая трубка, 2 — сверхпроводящий провод, 3 — бандаж из стеклоленты, 4 — межвитковая изоляция, 5 — проставка из текстолита, 6 — полуядро, 7 — змеевик для охлаждения ядра, 8 — полуобмотки

Обмотка выполнена из трубчатого кабеля, изготовленного путем навивки сверхпроводящих проводов на трубку из мельхиора диаметром $5 \times 0,5$ мм, предварительно облуженных, а затем пропущенных через ванну с расплавленным припоем, содержащим 95 % олова и 5 % серебра.

Основные данные сверхпроводящей обмотки и параметры магнита приведены в табл. 1 [4]. Криостатирование магнита осуществлялось потоком двухфазного гелия с параметрами: массовое паросодержание $0,1 \div 1$, удельный массовый расход $50 \div 350$ кг/м²·с, максимальная температура $4,3 \div 4,7$ К.

Полученные низкие значения деградации критического тока при больших скоростях изменения поля и больших энергетических потерях ($I_c/I_0 \approx 0,9$; $\dot{B} = 3,5$ Тл/с; $P = 15$ Вт) указывают на хорошие условия охлаждения. Это подтверждается тем, что не наблюдалось зависимости деградации критического тока в магните от удельного массового расхода и паросодержания в гелии в широком диапазоне изменения этих параметров. Тренировка магнита не наблюдалась. В процессе исследований осуществлялось более 100 переходов магнита из сверхпроводящего в нормальное состояние и 15 циклов отепления и охлаждения.

Очень успешный и доказательный эксперимент на магните ЦСД-1 был проведен при разделении питания полуобмоток двумя параллельными пото-

Таблица 1. Основные параметры сверхпроводящего магнита ЦСД-1

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

ками двухфазного гелия при искусственно создаваемых различных гидравлических сопротивлениях полуобмоток, отличающихся до двух раз, и больших тепловых нагрузках в 20 Вт, снимаемых парожидкостными потоками гелия с массовым паросодержанием до 0,7 [8].

Полученный экспериментальный материал при создании и испытаниях ЦСД-1 показывает принципиальную возможность осуществления криостатирования импульсно работающих сверхпроводящих магнитов с помощью параллельных парожидкостных потоков гелия.

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 (порядка 15 ÷ 20 мм), так как при шаге транспонирования ~ 50 мм оловянный припой не удерживает сверхпроводящую проволоку в местах изгиба, и нарушается тепловой контакт между трубкой охлаждения и сверхпроводящими проводочными жилами кабеля.

Паяный сверхпроводящий кабель имеет большие тепловыделения (кооперативные потери) при работе в импульсных магнитных полях. Исследования показали необходимость разработки новой конструкции сверхпроводящего кабеля для быстросцилирующих магнитов.

3. СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ТРУБЧАТЫЙ КАБЕЛЬ ДЛЯ БЫСТРОЦИКЛИРУЮЩИХ МАГНИТОВ НУКЛОТРОНА

Сверхпроводящий кабель для изготовления обмоток возбуждения магнитов нуклотрона проектировался исходя из нижеследующих требований: номинальный рабочий ток 6,0 кА; критический ток кабеля в поле 2,5 Тл не ниже 6,8 кА; рабочее напряжение изоляционного покрытия 2,5 кВ, минимальный радиус изгиба $18 \div 20$ мм; хорошая механическая прочность изоляции при температуре жидкого гелия и способность выдерживать большие радиационные нагрузки (суммарная поглощенная доза за время полной жизни принята равной $\sim 5 \cdot 10^6$ Гр).

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

В общем случае в изменяющемся магнитном поле возникают следующие виды потерь энергии в сверхпроводящих кабелях:

- 1) гистерезисные потери в сверхпроводящих волокнах проволок;
- 2) потери, вызванные собственным магнитным полем проволок;
- 3) кооперативные потери в композиционных проволоках;
- 4) вихревые потери в проволочной структуре (кабеле), вызванные индуцированными токами между проволоками.

Три первых вида потерь при импульсной работе определяются параметрами используемых промышленных композиционных проволок, применяемых для скруток в кабель, характером изменения тока возбуждения (транспортного тока) и внешнего магнитного поля, в котором находится сверхпроводник.

В четвертом случае потери в кабеле могут существенно меняться путем изменения его конструкции.

Основными конструкционными параметрами, которые влияют на вихревые потери в транспонированном кабеле, являются шаг транспонирования скручиваемых проволок и величина поперечного сопротивления кабеля, с увеличением которого в определенных пределах вихревые потери могут быть значительно снижены.

Для увеличения поперечного сопротивления в паяных скрутках и кабелях применяются для пайки высокоомные сплавы, в непаяных — производят разделение сверхпроводящих проволок изоляционными материалами в виде оксидных пленок, изоляционных лаков и др.

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 $5 \times 0,5$ мм, сверхпроводящую проволоку с медной матрицей типа СКНТ-0,5-1045-0,42 диаметром 0,5 мм, имеющую 1045 сверхпроводящих нитей диаметром 10 мкм из ниобий-титанового сплава НТ-50, коэффициент заполнения проволоки сверхпроводником равен 0,42 [9].

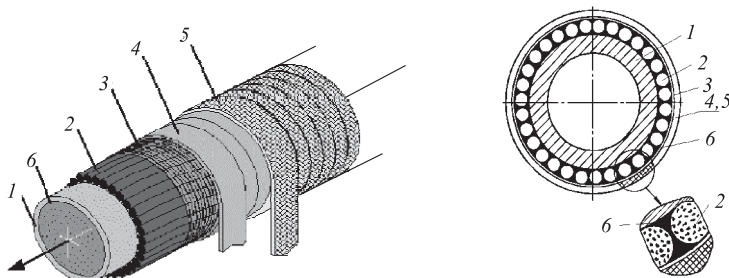


Рис. 5. Конструкция и основные параметры трубчатого сверхпроводящего кабеля для обмоток магнитов нуклотрона: диаметр NbTi-нитей 10 мкм; число нитей 1045; шаг твиста нитей 5 мм; шаг транспонирования проволок 47 мм; число проволок 31; 1 — мельхиоровая трубка диаметром 5 мм, 2 — сверхпроводящий провод диаметром 0,5 мм, 3 — бандаж из нихромовой проволоки, 4 — полиимидная лента (каптон), 5 — стеклотента, пропитанная эпоксидным компаундом, 6 — эпоксидный компаунд

Конструкция сверхпроводящего кабеля для нуклотрона приведена на рис.5. Технология его изготовления заключается в следующем: с помощью навивочной 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 — термореактивного связующего толщиной $0,1 \div 0,15$ мм.

Проведенные исследования показали, что наилучшим компаундом является термореактивное связующее, состоящее из следующих компонентов:

- смола ЭД-22 и ЭД-16 в соотношении 60 : 40 % — 100 весовых частей;
- отвердитель МТГФА и Изо МТГФА в соотношении 30 : 70 % — 80 весовых частей;
- полиметилсилоксановый каучук СКТ-20 — 23 весовых части;
- наполнитель флагопит (порошок из дробленой слюды) — 50 весовых частей.

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.

Изоляционное покрытие сверхпроводящего кабеля выбиралось из расчета радиационной стойкости, обеспечения необходимого срока службы, технологичности при изготовлении, механической и электрической прочности [10].

Изоляция сверхпроводящего кабеля состоит из четырех слоев полиимидной пленки (два слоя с 50 %-ным перекрытием) толщиной 40 мкм каждый (в сумме 160 мкм) и двух слоев стеклоленты толщиной 0,1 мм, обильно пропитанной вышеприведенным термореактивным эпоксидным компаундом с добавкой силиконового каучука, которая вводится для поглощения энергии, передаваемой от частиц эпоксидной смолы к частицам каучука, возникающей

вследствие 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 величину критического тока, близкую к максимальной. Компаунд разработан И.Е.Карпуниной.

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.

На рис. 6 для разных образцов сверхпроводящего трубчатого кабеля приведены результаты исследований зависимости энергии потерь (тепловыделений) от скорости изменения магнитного поля, пронизывающего сверхпроводящий кабель [11].

Первый образец нового сверхпроводящего кабеля был испытан в составе добавочного витка с радиусами изгиба 18 мм, размещенного в зазоре магнита ЦСД-1. Виток соединялся последовательно с обмоткой магнита по электрической цепи и по каналу охлаждения. При этом изучалась степень деградации критического тока в коротком образце кабеля в зависимости от скорости изменения поля в апертуре магнита, которая приведена на рис. 7.

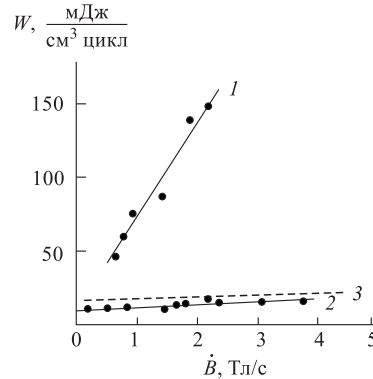


Рис. 6. Зависимость энергии потерь от скорости изменения поля для трубчатых образцов сверхпроводящего кабеля нуклотрона: 1 — для образца, пропаянного оловянно-серебряным припоем, 2 — для пучка изолированных сверхпроводящих проводов, имитирующих провода в трубчатом кабеле (31 провод), 3 — для конструкции кабеля с бандажом из нихромовой проволоки (выбран для магнитов нуклотрона)

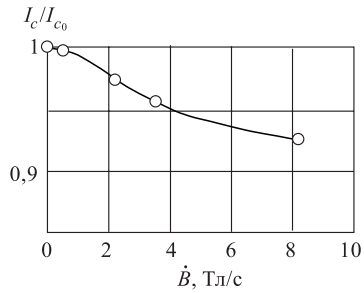


Рис. 7. Зависимость степени деградации критического тока в образце кабеля новой конструкции от скорости изменения магнитного поля в апертуре диполя при возбуждении его обмотки импульсами тока треугольной формы без пауз между импульсами

Для того чтобы определить эту зависимость, образец был изготовлен из сверхпроводящих проводов, имеющих более низкое значение критической плотности тока в магнитном поле до 2 Тл по сравнению с критической плотностью тока в сверхпроводящих проводах кабеля обмотки магнита.

В заключение можно отметить, что рассматриваемая конструкция сверхпроводящего кабеля отвечает поставленным задачам, технологична и проста в изготовлении, что позволило сделать в 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.

4. МОДЕЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ПОЛНОМАСШТАБНЫЙ ДИПОЛЬ ЦСД-2

Для отработки технологии изготовления дипольных магнитов с обмоткой из сверхпроводящего трубчатого кабеля новой конструкции, оценки затрат на их производство и получение экспериментальных характеристик в 1981—1983 гг. был создан полномасштабный дипольный магнит ЦСД-2 и проведены испытания двух модификаций этого магнита [5].

Конструкция магнита приведена на рис. 8, основные характеристики — в табл. 2.

Магнит состоит из двух симметричных частей по аналогии с магнитом ЦСД-1, отличие — лобовые части полуобмоток отогнуты на 90° по отношению к медианной плоскости магнита. Габариты шихтованного железного яра $1400 \times 256 \times 166$ мм, размер апертуры 90×42 мм. Двухслойная седлообразная обмотка (8), состоящая из двух симметричных частей, содержит двенадцать витков из трубчатого сверхпроводящего кабеля, описанного в разд. 3. После установки полуобмоток в яро они фиксируются с помощью болтов (3). Четыре стальных болта диаметром 8 мм, установленные через 300 мм по длине магнита (всего 16 болтов), подтягивают обмотку к железному яру через изолирующие прокладки (7). Магнит установлен в горизонтальном цилиндрическом криостате на одной опоре (6), расположенной по центру (см. рис. 8, а).

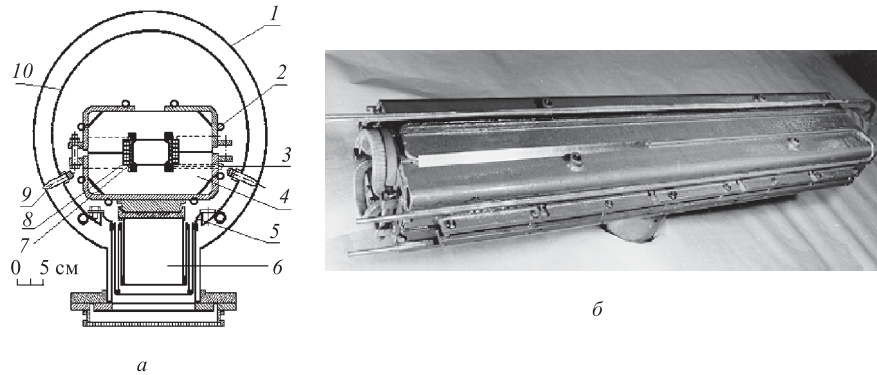


Рис. 8. *а*) Компоновка магнита ЦСД-2 в криостате: 1 — вакуумный кожух, 2 — змеевик для охлаждения ярма, 3 — болт, 4 — железное ярмо, 5 — тепловой контакт, 6 — опора магнита, 7 — прокладка, 8 — сверхпроводящая обмотка, 9 — опора азотного экрана, 10 — азотный экран. *б*) Общий вид магнита ЦСД-2

Криостатирование полуобмоток магнита осуществлялось потоком двухфазного гелия со следующими параметрами: массовое паросодержание $0 \div 1$; удельный массовый расход $12 \div 260 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$, максимальная температура $4,5\text{--}5 \text{ К}$.

Критический ток в магните при температуре $4,5 \text{ К}$ составил 6 кА . Такое значение критического тока целиком и полностью определено низким значением критического тока проволоки, из которой был сделан сверхпроводящий кабель этого магнита.

Магнит возбуждался непрерывными импульсами тока в соответствии с графиком, представленным на рис. 9. Общие тепловыделения в магните (энергетические потери и статический теплоприток) составили 42 Вт . Статический теплоприток к магниту, включая и теплоприток по опоре, составил $3,3 \text{ Вт}$. Теплоприток к регулирующим вентилям $0,8 \times 2 = 1,6 \text{ Вт}$.

Для снижения энергетических потерь в шихтованном магнитопроводе его конструкция была изменена: из ярма были исключены стальные пластины толщиной 14 мм , располагавшиеся через каждые 300 мм по длине магнита, в которых были проделаны отверстия для болтов и пазы для деталей крепления обмотки. Обрамляющие конструкции магнитопровода торцевые накладки и уголки были сделаны из нержавеющей стали.

В модифицированном магните ЦСД-2М обмотка просто закладывается в магнитопровод и зажимается полюсными поверхностями ярма магнита.

Для более жесткого закрепления магнита в криостате был применен другой способ его фиксирования в пространстве — с помощью 8 растяжек по центру криостата (совмещение осей).

Таблица 2. Основные характеристики модельного полномасштабного дипольного магнита нуклотрона ЦСД-2М

Апертура магнита, мм	92×42
Физическая длина магнита, мм	1486
Размеры железного ярма, мм	$1400 \times 256 \times 166$
Масса магнита, кг	360
Число витков обмотки	12
Индуктивность, мГн	0,635
Длина кабеля в обмотке, м	45
Диаметр трубки кабеля (мельхиоровой), мм	$5 \times 0,5$
Число СП-проводов $\varnothing 0,5$ мм, НТ-5	31
Число СП-нитей в проводе	1045
Диаметр СП-нитей, мкм	10
Внешний диаметр кабеля с изоляцией, мм	~ 7
Критический ток магнита при $T = 4,4$ К, А	6470
Запасенная энергия, кДж	13,3
Суммарная интегральная относительная неоднородность магнитного поля в апертуре на уровне $B = 2$ Тл	$4,1 \cdot 10^{-4}$
Общий теплоприток к гелию в магните при работе в трапециевидном цикле с периодом 2 с, $B_{\max} = 2$ Тл и $\dot{B} = 4$ Тл/с, Вт	11

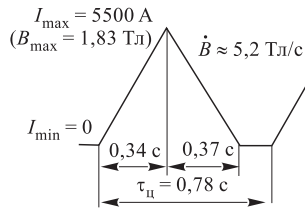


Рис. 9. График тока возбуждения магнита и временные параметры цикла

Исследования модифицированной конструкции магнита ЦСД-2М показали: тепловыделения в магните при работе в цикле по графику тока (рис. 9) уменьшились на 10 Вт (с 42 до 32 Вт), статический теплоприток к магниту 1,5 Вт, критический ток в магните при температуре 4,35 К равен 6470 А.

Магнит устойчиво работал при уменьшении расхода гелия до 0,40 г/с, при этом паросодержание потока гелия на выходе из обмотки составляло ~ 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 плато тока приведены на рис. 10.

Численное проверочное моделирование поля сверхпроводящего диполя ЦСД-2 и анализ нелинейных эффектов с целью оптимизации конструкций магнита в соответствии с требованиями, связанными с насыщением железного ярма и влиянием размеров изоляционных прокладок между обмоткой и маг-

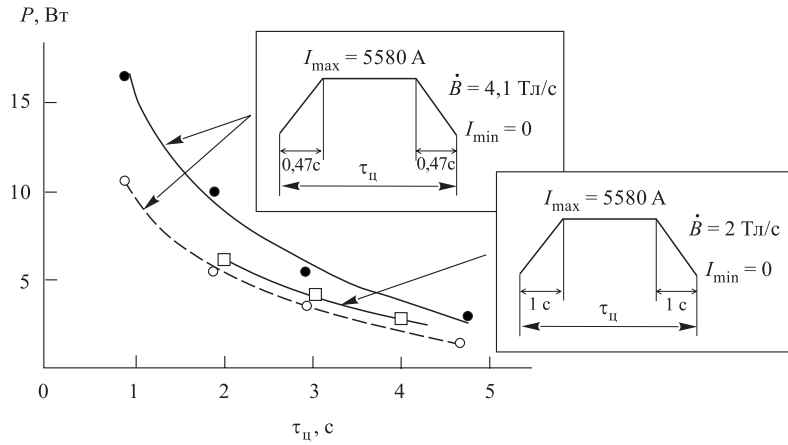


Рис. 10. Энергетические потери P в магните в зависимости от длительности τ трапециевидных импульсов тока его возбуждения при неизменных скоростях изменения поля в апертуре $\dot{B} = 4,1 \text{ Тл/с}$. Длительность плато тока на уровне 5580 А изменялась в процессе эксперимента. Сплошная линия — энергетические потери в магните. Пунктирная линия — энергетические потери в железном ярме магнита

нитопроводом (корпусная изоляция) и влиянием лобовых частей, проводились на основе метода объемных интегральных уравнений и метода сопряженных градиентов по программам MAGSYS, POISCR, POISON [12].

5. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТИПА

Выполненный цикл работ по моделированию и исследованиям нового типа магнитов позволил в условиях ЛВЭ ОИЯИ разработать проект и создать первый в России действующий сверхпроводящий синхротрон, основанный на миниатюрных экономичных сверхпроводящих магнитах нового типа — с железным ярмом и обмоткой возбуждения из трубчатого сверхпроводящего кабеля, разработанного для импульсного режима работы.

Основные концептуальные преимущества и новизна магнитной системы нуклотрона состоят в следующем:

1. Магнитная система нуклотрона способна работать с частотой повторения циклов ускорения до $0,5 \div 1 \text{ Гц}$ при соответствующей мощности гелиевых рефрижераторов и источников электропитания, что особенно важно для повышения средней интенсивности ускоренных пучков ускорителя, а также при работе в бустерных режимах в процессе дальнейшей модернизации ускорительного комплекса ЛВЭ.

2. Принятая конструкция магнитной системы позволяет использовать в качестве хладагента двухфазный гелий, что в несколько раз снижает расход прокачиваемого через магнитную систему гелия и упрощает в целом систему криогенного обеспечения нуклотрона. Сравнительно малое количество гелия в магнитной системе ускорителя и высокое значение допускаемого давления в ее охлаждающих каналах обеспечивают системе высокую безопасность в аварийных режимах при быстрых отеплениях.

3. Магнитная система на основе магнитов с трубчатой обмоткой не имеет гелиевого сосуда.

Это обстоятельство приводит к упрощению целого ряда узлов и криогенно-магнитной системы ускорителя в целом: облегчает доступ к магнитам, линзам и др. устройствам, расположенным внутри разборного вакуумного кожуха; исключает возможность появления гелиевых течей в вакуумной камере ускорителя. Стенки ионопровода разделяют сверхглубокий вакуум в камере $10^{-10} - 10^{-11}$ торр и вакуум в изоляционном пространстве криостатной системы порядка $10^{-6} - 10^{-7}$ торр.

4. В трубчатой сверхпроводящей обмотке магнитов нуклотрона поток тепла, вызванный ее импульсным возбуждением, на своем пути к криоагенту не встречает витковой и корпусной изоляции обмотки. Поэтому даже быстроциркулирующий магнит из трубчатого сверхпроводника можно сделать с высокой электрической прочностью. Это преимущество — залог эксплуатационной надежности, особенно при работе в радиационных условиях, и позволяет делать обмотку отдельно от магнитопровода с жесткими допусками на геометрические размеры и большой механической прочностью.

5. Ввиду большой (12 кА/см^2) конструктивной плотности тока в сверхпроводящей обмотке ее геометрические размеры во много раз меньше по сравнению с резистивными обмотками «теплых» магнитов. В результате сверхпроводящий магнит по металлоемкости получается в ~ 5 раз меньше по сравнению с «теплым» магнитом, имеющим такую же апертуру.

6. В нуклотроне обеспечивается высокая однородность магнитного поля в рабочей апертуре магнитов (соответственно, градиента поля в линзах) в полном динамическом диапазоне токов возбуждения от 0,1 до 6 кА, что позволяет инжектировать в кольцо ускорителя низкоэнергетичные пучки ядер (5 МэВ/нуклон) из ЛУ-20. Сооружение нуклотрона на базе «безжелезных» традиционных магнитов типа « $\cos \theta$ » потребовало бы дорогостоящей реконструкции инжекционного комплекса для повышения энергии инжектируемых ядер вследствие высокого уровня в этих магнитах «замороженных полей». Длительность плато поля от 0,1 до 10 с.

7. Магниты с трубчатой сверхпроводящей обмоткой чрезвычайно просты по конструкции, технологичны и дешевы в изготовлении. Все это позволило изготовить криогенно-магнитную систему нуклотрона силами ЛВЭ и Опытного производства ОИЯИ с использованием имеющегося парка станков и в

несколько раз уменьшить затраты на изготовление по сравнению с вариантом промышленного изготовления.

8. Создание сверхпроводящего ускорителя — нуклотрона проходило в рамках проекта по замене магнитной системы синхрофазотрона ОИЯИ на сверхпроводящую.

Полная реализация этого проекта позволит снизить в несколько раз затраты на электроэнергию при работе нового ускорительного комплекса (не считая затрат на электропитание каналов транспортировки частиц).

6. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ НУКЛОТРОНА

Окончательная концепция нуклотрона была выработана после всесторонних исследований работы модельных образцов магнитов нового типа в 1983 г. [13]. При разработке структурного построения магнитной системы ускорителя с жесткой фокусировкой пучка были учтены нижеследующие условия:

а) соответствие основных параметров ускорителя поставленным физическим задачам: максимальная энергия ядер с отношением заряда к массовому числу $q/A = 0,5$; $E = 6$ ГэВ/нуклон;

б) размещение магнитной системы нуклотрона в имеющемся кольцевом туннеле вокруг фундамента синхрофазотрона ОИЯИ в цокольном этаже здания ускорителя;

в) использование на начальной стадии эксплуатации нуклотрона инжекционного комплекса синхрофазотрона на базе линейного ускорителя ЛУ-20 с энергией инжекции ядер 5 МэВ/нуклон; для ускорения тяжелых ядер необходимо развитие инжекционного комплекса;

г) экономичность, заключающаяся в минимальных затратах на сооружение магнитной системы ускорителя и последующую эксплуатацию нуклотрона;

д) использование нуклотрона как в физическом эксперименте, так и в качестве бустерного каскада в составе супернуклотрона, получение растяжек выведенных пучков до 10 с;

е) применение простых и технологичных конструкций элементов магнитной оптики и устройств их криостатирования с возможностью изготовления в условиях Опытного производства ОИЯИ;

ж) высокая надежность в работе, простота в эксплуатации, легкая доступность ко всем устройствам магнитной системы и хорошая ремонтоспособность.

Размеры имеющегося кольцевого туннеля у основания фундамента синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ (внешняя сторона) позволили разместить в цоколь-

ном этаже корпуса ускоритель с периметром ~ 251 м и числом суперпериодов, кратным 4. План расположения нуклотрона приведен на рис. 11.



Рис. 11. Схема расположения систем нуклотрона: ЛУ — линейный ускоритель-инжектор, МВ1 и МВ2 — направления каналов медленного вывода, БВ — быстрый вывод, ИП — инфлекторные пластины, ЭС — электростатический септум, МЛ — магнит Ламбертсона, УМ — ударный магнит

Изучение различных вариантов структуры магнитной системы нуклотрона с целью оптимизации апертуры магнитов при заданных параметрах инжектируемого и выводимого пучка, обеспечения устойчивого процесса ускорения частиц на протяжении всего ускорительного цикла при отсутствии структурных резонансов, определения возможности размещения ускоряющих станций, устройств медленного вывода, системы коррекции магнитного поля, устройств диагностики пучка и др. привело к выбору нижеследующего наиболее оптимального варианта.

Выбранная магнитная структура состоит из 8 суперпериодов, в каждый из которых входят 3 регулярных периода типа ФОДО и один период, не содержащий дипольных магнитов (большой линейный промежуток) [2]. Схемы двух типов периодов нуклотрона приведены на

рис. 12. Регулярный период включает в себя фокусирующую и дефокусирующую квадрупольные линзы, четыре дипольных магнита и два малых свободных промежутка, предназначенных для размещения мультипольных корректоров и устройств диагностики пучка.

Для сверхпроводящих магнитных систем с целью уменьшения общей массы охлаждаемых магнитов очень важно оптимизировать размеры рабочей апертуры магнитов. Поэтому для того, чтобы в начале цикла ускорения инжектируемый пучок огибал выводные устройства — электростатический септум, магниты Ламбертсона, перед линейным промежутком, где они расположены, и после него устанавливаются по два диполя с расширенной горизонтальной апертурой. Эти магниты подпитываются на начальном этапе ускорения соответствующими по направлению дополнительными токами по отношению к общему току дипольных магнитов, чтобы создать в районе выводного промежутка локальное смещение орбиты.

В этом случае в остальных диполях кольца нуклотрона, как показывают расчеты, горизонтальный размер апертуры можно уменьшить до значения 90 мм, рассчитанного с учетом условий инжекции и процесса ускорения.

Однако, исходя из требований к однородности поля в рабочей части апертуры диполей и квадруполов, были приняты следующие единые горизон-

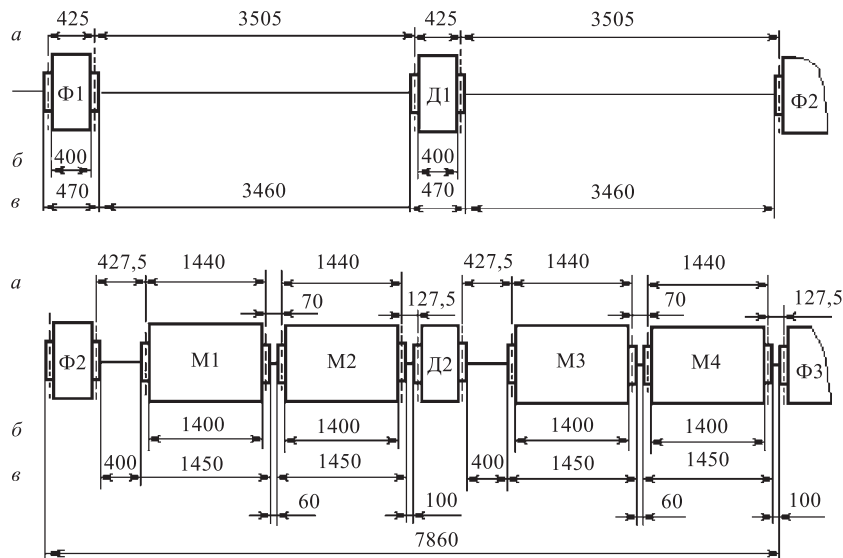


Рис. 12. Схемы двух типов периодов ускорителя: а) эффективные длины, б) длина магнитопровода, в) физическая длина магнита (Ф и Д — квадрупольные линзы, М — дипольные магниты)

тальные и вертикальные размеры апертур элементов магнитной оптики нуклотрона: для дипольных магнитов 110×56 мм, для квадрупольных магнитов 120×63 мм.

Основные параметры магнитной системы нуклотрона приведены в табл. 3.

Одним из неперменных условий устойчивой динамики пучка в жесткофокусирующем синхротроне и уменьшения потерь частиц при ускорении является соблюдение достаточно строгих допусков на однородность магнитного поля в дипольных магнитах и градиента в квадрупольных линзах регулярной структуры в пределах рабочей области апертуры магнитов во всем динамическом диапазоне изменения поля при ускорении, начиная с момента инъекции. Кроме заданных допусков на интегральные погрешности однородности по длине магнитных элементов, необходимо выдержать в пределах $\sim 10^{-4}$ разбросы эффективных длин диполей и 10^{-3} — квадруполь, положения медианной плоскости в диполях и совпадение магнитной и геометрических осей квадруполь. Допуски на погрешности магнитного поля структурных элементов (диполей и квадруполь) нуклотрона и др., рассчитанные исходя из допустимых величин искажения орбиты, сдвигов частот бетатронных колебаний и их резонансов, приведены в табл. 4.

Расчет допусков на погрешности магнитного поля были проведены В.А.Михайловым и др. При серийном изготовлении одинаковых магнитов

Таблица 3. Основные параметры магнитной системы нуклотрона

1. Общие данные	
Энергия инъекции, МэВ/нуклон	6
Энергия ядер с $q/A = 0,5$ при $B = 2,08$ Тл, ГэВ/нуклон	6
протонов, ГэВ	12,8
Периметр, м	251,52
Максимальная интенсивность (кулоновский предел), A/q^2 част./цикл	$5 \cdot 10^{11}$
Длительность инъекции, мкс	$5 \div 8$
Длительность медленного вывода (плато поля), с	$0,1 \div 10$
Диапазон энергий медленного вывода, ГэВ/нуклон	$0,2 \div 6$
Критическая энергия, ГэВ	7
Частота циклов работы, Гц	до $0,25 \div 1$
2. Структура и магнитные элементы	
Количество суперпериодов	8
Количество периодов типа ФОДО	32
Частоты бетатронных колебаний	6,75
Количество дипольных магнитов	48×2
квадрупольных линз	32×2
Индукция в дипольных магнитах при инъекции, Тл	0,0455
максимальная, Тл	2,0830
Градиент в линзах Ф при инъекции, Тл/м	0,761
максимальный, Тл/м	34,892
Градиент в линзах Д при инъекции, Тл/м	-0,752
максимальный, Тл/м	-34,456
Радиус кривизны в дипольных магнитах, м	22
Сагитта в дипольных магнитах, мм	5,8
Апертура диполей, мм	56×110
Апертура квадруполей, мм	63×120

поле в них будет отличаться друг от друга вследствие следующих причин:

— ошибки в геометрических размерах окна (на всех уровнях поля) и внешних размеров магнитопровода (на высоких уровнях индукции поля при насыщении сердечника);

— ошибки в геометрических размерах длины магнитопровода;

— различная плотность упаковок пластин в магнитопроводе (яреме);

— различная магнитная проницаемость отдельных пластин магнитопровода;

— неравномерная укладка витков в основной обмотке возбуждения;

— разброс остаточных полей в железных магнитопроводах после намагничивания (влияние на уровне полей инъекции).

Таблица 4. Допуски на погрешности магнитного поля структурных магнитов и линз нуклотрона и их пространственное положение

Тип нелинейности	Стат. характер.	Значение	
		Магнит	Линза
Разброс эффективных длин	ср. квадр.	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}
Точность определения угла поворота медианной плоскости вокруг продольной оси элемента	ср. квадр.	10^{-4}	10^{-4}
Косой квадруполь (2-я гармоника)	среднее	не вычислялось	—
	ср. квадр.	10^{-4}	10^{-4}
Прямой секступоль (3-я гармоника)	среднее	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
	ср. квадр.	$4 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}
Косой секступоль (3-я гармоника)	среднее	не вычислялось	—
	ср. квадр.	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Прямой октуполь (4-я гармоника)	среднее	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}
	ср. квадр.	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Косой октуполь (4-я гармоника)	среднее	не вычислялось	—
	ср. квадр.	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Прямые мультиполи высшего порядка (5–10-я гармоники)	среднее	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Точность определения координат магнитной оси			0,05 мм

Примечание. Относительная погрешность магнитного поля рассчитывалась на радиус $R=40$ мм.

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.

В процессе исследований однородности магнитного поля в апертуре модельных магнитов, а также при серийном изготовлении проводился контроль параметров магнитного поля в изготавливаемых элементах магнитной системы нуклотрона.

При контроле использовался индукционный метод измерений с помощью гармонических катушек. Он основан на разложении в ряд Фурье наведенной в катушке ЭДС, пропорциональной компоненте вектора B_θ при разных угловых положениях катушки в апертуре тестируемого магнита [28].

Принятый способ описания двумерного магнитного поля заключается в его представлении через ряд Фурье в цилиндрической системе координат r, θ, z (или через ряд Тейлора в прямоугольной системе координат x, y, z).

Тогда соответствующие уравнения приобретают вид

$$B_{\theta} = \sum_{n=1}^{\infty} B_{\text{ref}} \left[\frac{r}{r_{\text{ref}}} \right]^{n-1} [b_n \cos(n\theta) + a_n \sin(n\theta)],$$

$$B_r = \sum_{n=1}^{\infty} B_{\text{ref}} \left[\frac{r}{r_{\text{ref}}} \right]^{n-1} [b_n \sin(n\theta) - a_n \cos(n\theta)]$$

или

$$By + iBx = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{\text{ref}}}{r_{\text{ref}}^{n-1}} (b_n - ia_n)(x + iy)^{n-1},$$

где B_{θ} — азимутальная составляющая, B_r — радиальная составляющая вектора поля вокруг оси симметрии, n — номер гармоники поля, r_{ref} — радиус приведения, B_{ref} — величина амплитуды основной составляющей поля магнита на радиусе приведения (в случае диполя $B_{\text{ref}} = B_1$, для квадруполя $B_{\text{ref}} = B_2 = Gr$, где G — градиент поля), b_n и a_n — коэффициенты соотношения амплитуд нормальных и косых гармонических составляющих магнитного поля на радиусе $r = r_{\text{ref}}$ к основной составляющей.

Для более тщательного изучения рассматривают трехмерное поле. Достаточно знать значение интеграла поля вдоль продольной оси магнита z и эффективную длину зоны действия составляющих поля на частицы $l_{\text{эфф}}$. Тогда уравнения приобретают вид

$$\int_{-\infty}^{+\infty} B_{\theta} dz = \sum_{n=1}^{\infty} B_{l_{\text{ref}}} \left[\frac{r}{r_{\text{ref}}} \right]^{n-1} [b_n^* \cos(n\theta) + a_n^* \sin(n\theta)],$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} B_r dz = \sum_{n=1}^{\infty} B_{\text{ref}} \left[\frac{r}{r_{\text{ref}}} \right]^{n-1} [b_n^* \sin(n\theta) - a_n^* \cos(n\theta)]$$

или

$$\int B_y dz + i \int B_x dz = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{\text{ref}}}{r_{\text{ref}}^{n-1}} [b_n^* - ia_n^*] [x - iy]^{n-1},$$

где $a_n^* = a_n l_{\text{эфф}}$, $b_n^* = b_n l_{\text{эфф}}$. Из данных по магнитным измерениям с большой точностью можно определить значения гармонических коэффициентов a_n и b_n во всем диапазоне токов возбуждения и по ним вычислить все параметры магнитного поля, необходимые для создания качественных элементов магнитной системы ускорителя. Как правило, определяются следующие параметры:

а) для дипольных магнитов:	
центральное поле	$B_0 = B_y(z = 0) = B_{\text{ref}}b_1,$
интегральное поле	$BL = \int B_y dz = B_{\text{ref}}b_1^*,$
эффективная длина	$L_m = BL/B_0,$
угол наклона медианной плоскости	$\Delta\theta = \frac{\int B_x dz}{\int B_y dz} = \frac{a_1^*}{b_1^*},$
мультипольные составляющие:	
нормальные	$b_2, b_3, b_4 \dots b_2^*, b_3^*, b_4^* \dots$
косые	$a_2, a_3, a_4 \dots a_2^*, a_3^*, a_4^* \dots$
б) для квадрупольных линз:	
градиент поля в центре линзы	$G_0 = \frac{dB_y}{dB_x} = \frac{B_{\text{ref}}}{r_{\text{ref}}} b_2,$
интегральный градиент поля	$GL = \int \frac{dB_y}{dB_x} dz = \frac{B_{\text{ref}}}{r_{\text{ref}}} b_2^*,$
эффективная длина линзы	$L_m = GL/G_0,$
смещение оси	$\Delta y = \int B_x dz/GL = a_1^*/b_2^*,$
	$\Delta x = \int B_y dz/GL = b_1^*/b_2^*,$
угол наклона линзы	$\Delta\theta = \frac{\int \frac{dB_x}{dB_y} dz}{2GL} = \frac{a_2^*}{2b_2^*},$
мультипольные составляющие:	
нормальные	$b_3, b_4, b_5 \dots b_3^*, b_4^*, b_5^*,$
косые	$a_3, a_4, a_5 \dots a_3^*, a_4^*, a_5^*.$

Необходимость в этих данных определена их жесткой взаимосвязью через динамику движения частиц и параметры пучка в процессе ускорения с оптимальной работой создаваемого ускорителя. Так, на искажение орбиты влияют интервалы разброса $\langle \Delta BL \rangle$ и $\langle \Delta\theta \rangle$ в дипольных магнитах, а также $\langle \Delta x \rangle$ и $\langle \Delta z \rangle$ в магнитных линзах.

Размеры огибающей пучка определяются интервалами разброса $\langle \Delta GL \rangle$ и $\langle \Delta\theta \rangle$ в квадрупольных линзах, а мультиполи высших порядков (систематические и случайные) вызывают нелинейные резонансы. 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 [14].

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

Поскольку при создании магнитной системы не всегда по целому ряду обстоятельств удастся выполнить все необходимые чрезвычайно высокие требования, то для корректировки орбиты в магнитной системе нуклотрона в малых линейных промежутках в едином блоке с квадрупольными магнитами

расположено 28 сверхпроводящих мультиполюсных корректоров (МПК) с 3 и 4 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, косвенное охлаждение [15].

7. ДИПОЛЬНЫЙ МАГНИТ. КОНСТРУКЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Магнит нуклотрона 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 (рис. 13, 14).

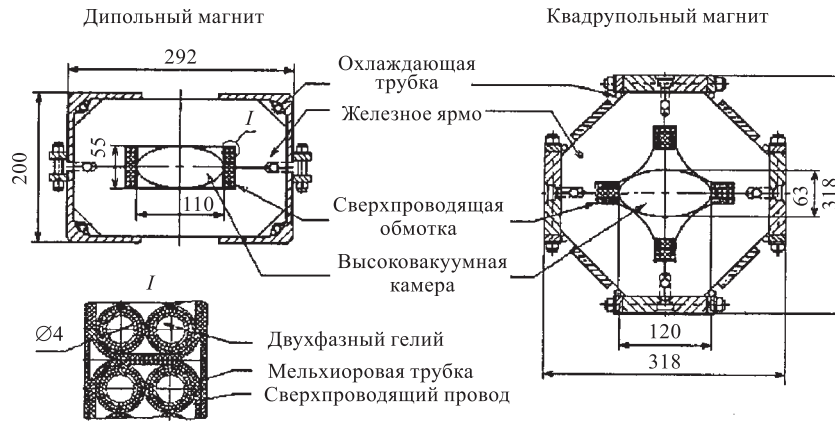


Рис. 13. Габаритные размеры структурных элементов магнитной системы нуклотрона

Полуярмо диполя набирается из штампованных пластин листовой электротехнической стали марки Э-330 толщиной 0,5 мм. По краям пакета располагаются торцевые пластины толщиной 25 мм из стали марки Ст-3, изготовленные по размерам штампованных пластин и обработанные на фрезерном станке по всем плоскостям.

Для сборки полуярма был разработан специальный стапель. Шихтованный пакет с торцевыми пластинами собирается на точно изготовленной направляющей стапеля. Затем на пакет накладываются два продольных уголка из стали марки Ст-3, у которых предварительно обработаны на фрезерном станке внутренние и внешние плоскости. На каждый уголок свинцово-

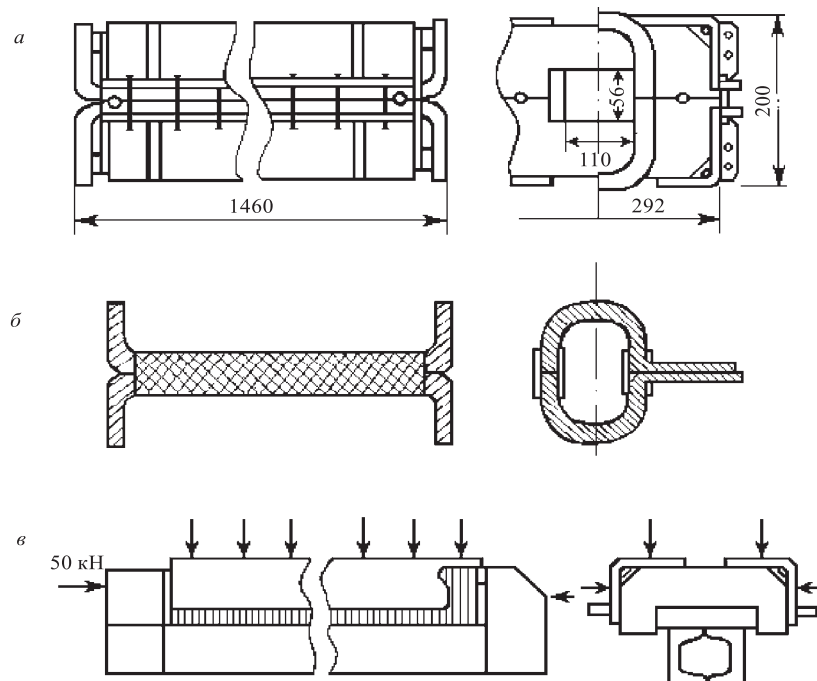


Рис. 14. *а)* Общий вид сверхпроводящего дипольного магнита нуклотрона; *б)* сверхпроводящая обмотка возбуждения; *в)* схема сборки полуярма магнита на стапеле

оловянным припоем напаяны медные трубки диаметром 12×1 мм, предназначенные для охлаждения железного яра и отвода тепла, возникающего в магнитопроводе под действием вихревых токов. Уголки поджимаются с помощью специальных струбцин к шихтованному пакету по схеме рис. 14, *в* с одновременным сжатием пакета через торцевые щеки в продольном направлении с контролируемым усилием 50 кН. Затем пакет, уголки и торцевые щеки соединяются прерывистыми электросварочными швами в соответствии со сборочными чертежами и к уголкам привариваются соединительные фланцы и ушки для крепления кронштейнов подвески магнитов в криостате.

После снятия полуярма со стапеля его рихтовали, провели предварительную обработку на фрезерном станке и финишную доводку до окончательных размеров внутреннего окна яра с точностью по высоте 0,01 мм и по ширине 0,05 мм на шлифовальном станке в соответствии с заданными допусками, подвергались шлифовке также плоскости разъема магнитопровода и базовые поверхности.

Затем два полуярма были собраны в единый магнитопровод и сделаны калиброванные отверстия под штифты. Завершается механообработка опе-

рацией фрезерования торцевых поверхностей собранного магнитопровода с доводкой размера магнитопровода по длине с точностью 0,1 мм.

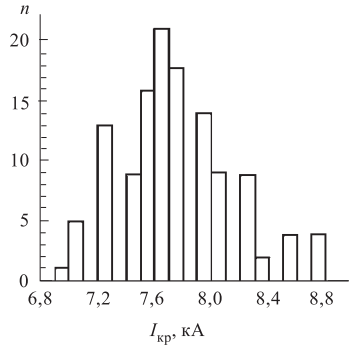


Рис. 15. Распределение числа сверхпроводящих дипольных магнитов нуклотрона по величине критического тока (серийное изготовление)

выдержкой. Всего было изготовлено по такой технологии более 100 магнитов.

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 (рис. 14,б). 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 полимеризации эпоксидного компаунда обмотка на шаблонном приспособлении проходит термообработку по специальному плавному графику подъема и спада температуры во времени. Максимальная температура полимеризации 180 °С с трехчасовой

Таблица 5. Токовые зависимости структурных элементов магнитной системы нуклотрона, где W — энергия пучка, B_m — индукция в зазоре дипольного магнита, L_m — эффективная длина дипольного магнита, $G_{дл}$ — градиент магнитного поля квадрупольного магнита, $L_{дл}$ — эффективная длина квадрупольного магнита

$I, \text{А}$	$W, \text{МэВ/нуклон}$	$B_m, \text{Тл}$	$L_m, \text{м}$	$G_{дл}, \text{Тл/м}$	$L_{дл}, \text{м}$
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

При паспортизации все магниты прошли тестовые испытания для определения критического тока и замера интегральных нелинейностей поля в апертуре при

работе в цикле со скоростью подъема и спада поля $\dot{B} = 2$ Тл/с при общей длительности цикла, равной 2 с.

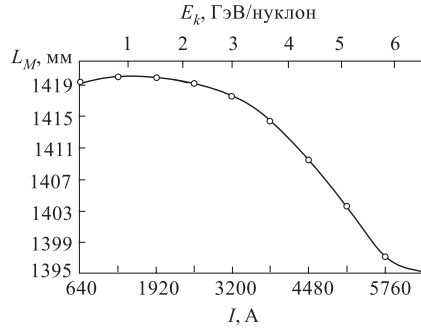


Рис. 16. Зависимость средней эффективной длины дипольных магнитов нуклотрона от тока и кинетической энергии иона

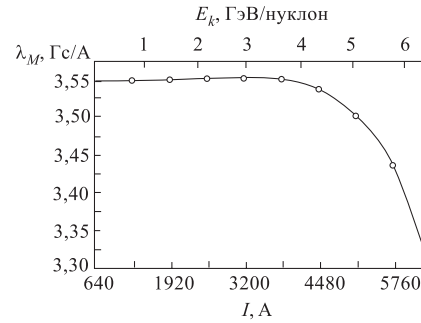


Рис. 17. Зависимость передаточной функции дипольных магнитов нуклотрона от тока и кинетической энергии иона

На рис. 15 приведено распределение числа дипольных магнитов нуклотрона в зависимости от достигнутых при тренировке максимальных значений критического тока.

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

На рис. 16, 17 приведена зависимость эффективной длины L_M и передаточной функции λ_M диполей от тока возбуждения. Спад кривых на высоких индукциях обусловлен эффектом насыщения железных магнитопроводов дипольных магнитов.

Результаты магнитных измерений показали, что среднеквадратичный разброс эффективных длин диполей $\langle L_M \rangle$ превышает систематическое значение L_M не более чем на 2,6 мм, а $\langle \lambda_M \rangle \leq 8 \cdot 10^{-3}$ в диапазоне токов от 0 до 6,4 кА.

На рис. 18 приведено распределение нормализованного к току 5,12 кА интегрального значения основной компоненты индукции магнитного поля в диполях нуклотрона: $\int \dot{B} dL / I$ (Тл·м/кА).

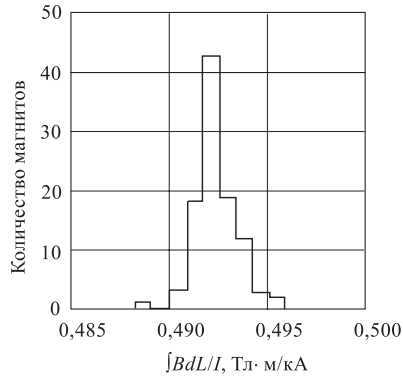


Рис. 18. Распределение нормализованного интеграла поля дипольного магнита нуклотрона, характеризующее идентичность изготовления магнитов

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 $n = 2, 4, 6$ (см. рис. 19.) Разброс интегральных значений остаточных магнитных полей в диполях по отношению к уровню поля при инжекции не превысил $\Delta B_{\text{ост}}/B_{\text{инж}} < 10^{-3}$ после возбуждения магнитов током 6500 А. При размагничивании магнитов обратным током 650 А остаточное поле уменьшается примерно на порядок [16–18].

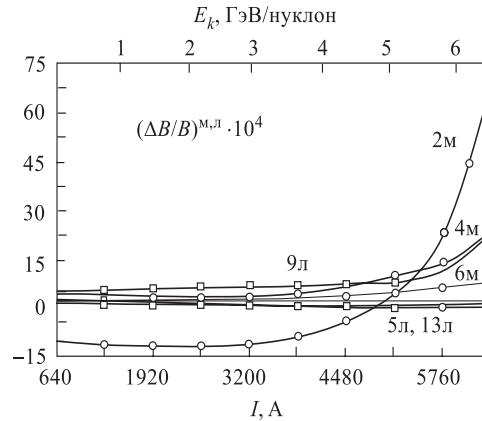


Рис. 19. Зависимость систематических неоднородностей поля дипольных (2м, 4м, 6м) и квадрупольных (5л, 9л, 13л) магнитов нуклотрона от тока и кинетической энергии на радиусе $R = 40$ мм (изображение гармоник поля из разложения в ряд Тейлора)

8. КВАДРУПОЛЬНЫЙ МАГНИТ. КОНСТРУКЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При выборе элементов магнитной системы нуклотрона рассматривались две основные конструкции линз (квадрупольных магнитов) регулярного периода: одна из них симметричная, с явно выраженными полюсами, другая прямоугольная, типа линзы Пановского. Каждая рассматривалась в качестве рабочей, численным методом исследовались ее характеристики и по ним подбирался наиболее оптимальный вариант [19]. Здесь же следует заметить, что в конечном итоге из-за сложности изготовления сверхпроводящих обмоток в линзах типа Пановского предпочтение было отдано варианту линзы с явно вы-

раженными полюсами. Основные параметры структурных сверхпроводящих квадрупольных магнитов нуклотрона приведены в табл. 6.

Таблица 6. Основные параметры структурных СП-магнитов нуклотрона

Параметры	Диполь	Квадруполь
Масса, кг	500	200
Конфигурация ярма	Оконная рама	Гиперболические полюсы
Длина ярма (по железу), мм	1370	430
Физическая длина, мм	1462	450
Апертура (гориз./вертик.), мм	110 × 55	120 × 63
Число витков в обмотке	2 × 8	4 × 5
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 $\dot{B} = 2$ Тл/с; $B_{\min} = 0$; $B_{\max} = 2$ Тл; $f = 0,5$ Гц, Вт	21	—
Динамические тепловыделения при $G = 33,4$ Тл/м·с; $G_{\min} = 0$; $G_{\max} = 33,4$ Тл/м; $f = 0,5$ Гц, Вт	—	12
Статические теплопритоки, Вт	6,6	5,2

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

На рис. 13 представлено поперечное сечение квадрупольного магнита нуклотрона с полюсами гиперболической формы в окончательной конструкции. Ярмо линзы состоит из четырех симметричных частей.

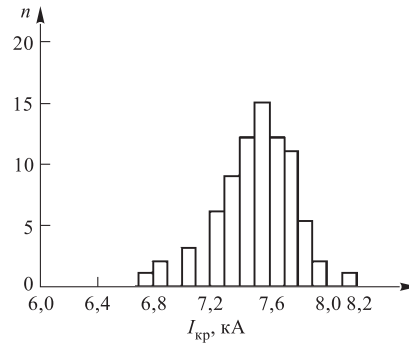


Рис. 20. Распределение числа сверхпроводящих квадрупольных магнитов нуклотрона по величине критического тока

Для серийного производства 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

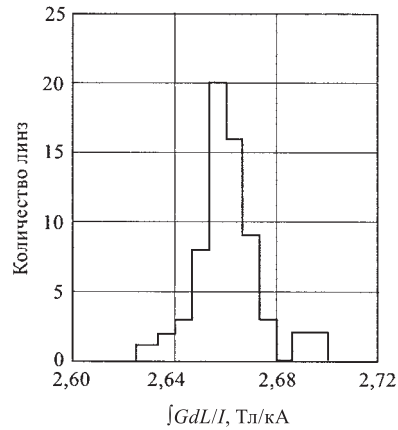


Рис. 21. Распределение нормализованного интеграла градиента поля квадрупольного магнита нуклотрона

друпольных магнитов нуклотрона приведена на рис.19–23 и в табл. 6 [16,17].

пластин из стали толщиной 20 мм электросваркой соединялись в единую конструкцию полюса. Магнитопровод линзы с помощью болтовых фланцевых соединений собирался из 4 полюсов на круглой направляющей. Затем на токарном станке обрабатывались торцевые поверхности полюсов, доводка продольного размера магнитопровода осуществлялась 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 и зажималась последними в строго фиксированном положении.

Информация о характеристиках ква-

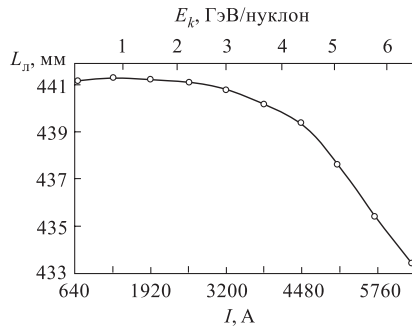


Рис. 22. Зависимость средней эффективной длины квадрупольных магнитов нуклотрона от тока и кинетической энергии иона

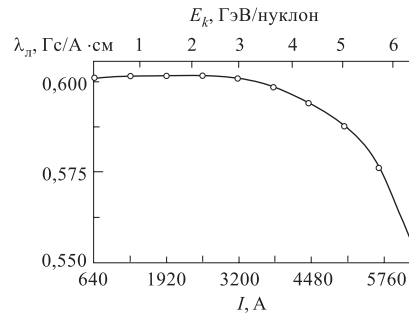


Рис. 23. Зависимость передаточной функции квадрупольных магнитов нуклотрона от тока и кинетической энергии иона

9. КРИОГЕННО-МАГНИТНЫЙ МОДУЛЬ И ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ КРИОГЕННО-МАГНИТОЙ СИСТЕМЫ

Концепция криогенно-магнитной системы ускорителя построена на следующих положениях:

- система собирается из одинаковых криогенно-магнитных модулей трех видов, соответственно, для дипольных, фокусирующих и дефокусирующих магнитов, обмотки которых соединены последовательно в три электрические цепи;

- обмотка возбуждения СП-магнитов выполняется из трубчатого сверхпроводника с низким значением динамических тепловыделений и хорошими условиями охлаждения;

- криостатирование магнита осуществляется потоком двухфазного гелия в диапазоне изменения паросодержания от 0 до 1;

- каналы охлаждения всех модулей подключены параллельно к питающему и отводящему гелиевым коллекторам;

- система имеет высокую надежность, простоту и минимальные затраты на сооружение и эксплуатацию, хорошую ремонтоспособность.

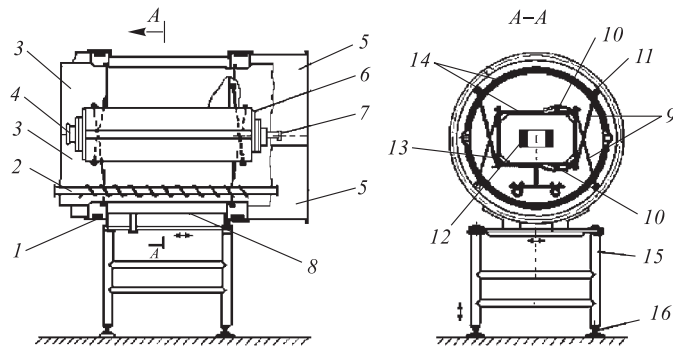


Рис. 24. Схема криогенно-магнитного модуля: 1 — сильфон; 2 — гелиевые коллекторы; 3 — тепловой экран; 4 — вакуумная камера; 5 — муфта; 6 — ярмо; 7 — трубопровод с жидким азотом; 8 — вакуумный кожух; 9 — тяга; 10 — СП-кабель электрической связи магнитов; 11 — тепловой мост; 12 — обмотка; 13 — трубка для охлаждения ярма; 14 — суперизоляция; 15 — подставка; 16 — домкрат

Схема криогенно-магнитного модуля представлена на рис.24. Магнит закреплен в криостате на восьми тягах (9) таким образом, что после его охлаждения от комнатной температуры до гелиевой положение в пространстве оптической оси магнита не изменяется. К обоим торцам вакуумного кожуха (8) с помощью накидных фланцев присоединены гибкие сильфонные элементы (1). Накидной фланец позволяет поворачивать модуль вокруг

продольной оси. Гибкие элементы дают возможность при юстировке перемещать соседние модули друг относительно друга на необходимую величину. Модуль устанавливается на подставку (15), имеющую приспособление для юстировки. Вакуумные кожухи модуля соединяются между собой с помощью разъемных муфт (5), обеспечивающих доступ к соединениям электрических и криогенных коммуникаций, аппаратуре для диагностики пучка, расположенной в малых промежутках между магнитами. Каждый модуль перед установкой на кольца ускорителя проходит комплексную проверку (гидравлическое сопротивление, электрическая прочность, магнитные измерения и др.) на специальных стендах.

При сборке криогенно-магнитной системы нуклотрона с помощью разборных вакуумных соединений стыкуются (см. рис. 24, 26) гелиевые коллекторы (2), трубопроводы с жидким азотом (7), вакуумная камера (4) и разъемные муфты (5) вакуумного кожуха соседних модулей.

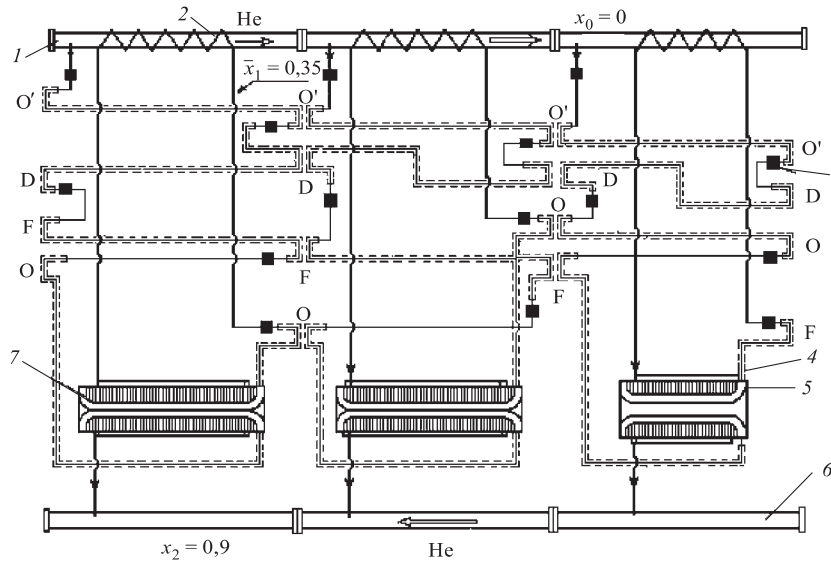


Рис. 25. Схема электрических и гелиевых коммуникаций криогенно-магнитных модулей: 1 — питающий коллектор; 2 — трубка для охлаждения коллектора; 3 — металлокерамическая электроизоляционная трубка; 4 — трубка для охлаждения железного ядра; 5 — обмотка квадруполя; 6 — отводящий коллектор; 7 — обмотка диполя; O, F, D — СП-кабель электрической связи, соответственно, отклоняющих, фокусирующих и дефокусирующих магнитов; O' — обратный кабель дипольных магнитов; x_1 , x_2 — среднее значение массового паросодержания в потоке гелия на выходе из каналов, соответственно, обмотки и трубки для охлаждения ядра; x_0 — массовое паросодержание в питающем коллекторе

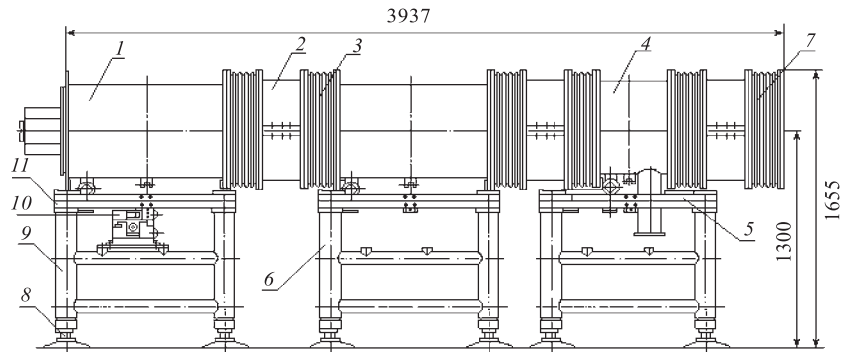


Рис. 26. Модульная сборка полупериода магнитной системы нуклотрона: 1 — кожух вакуумный дипольного магнита; 2 — кожух монтажный; 3 — компенсатор 4-гофрированный; 4 — кожух вакуумный квадрупольной линзы; 5 — установочная рама линзы; 6 — подставка линзы; 7 — компенсатор 3-гофрированный; 8 — домкрат; 9 — установочная рама диполя; 10 — подставка диполя; 11 — юстировочное приспособление

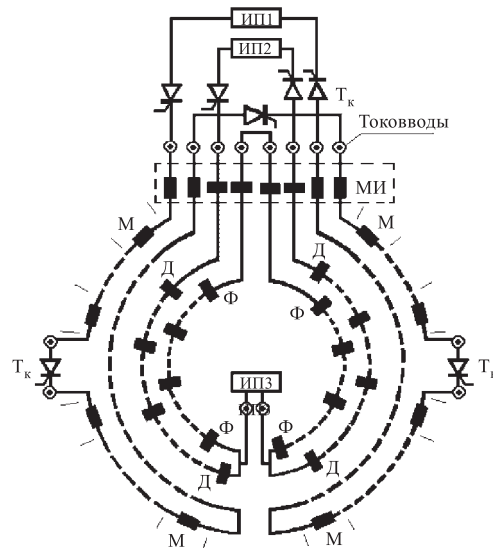


Рис. 27. Электрическая схема соединения групп магнитов нуклотрона: М — дипольный магнит (48×2 шт.); Ф — квадрупольный фокусирующий магнит (16×2 шт.); Д — квадрупольный дефокусирующий магнит (16×2 шт.); МИ — дипольные и квадрупольные измерительные магниты (вне кольца ускорителя); Тк — тиристорный ключ; ИП1, ИП2 — источники питания дипольных и квадрупольных магнитов; ИП3 — источник разбаланса токов групп магнитов Ф и Д

В каждом модуле, помимо электроцепи собственного магнита, имеются транзитные кабели электрической связи магнитов других групп (см. рис. 25). Для электрического соединения соседних модулей в каждом промежутке между магнитами выполняются четыре электрических спая трубчатых СП-кабелей. В местах спая СП-кабелей удаляется изоляционное покрытие и бандажная нихромовая проволока. Затем оголенные участки двух совместно сложенных СП-кабелей на длине порядка 150 мм плотно обматываются сверхпроводящей проволокой (предварительно сплюсненной до 0,2 мм и облуженной), обжимаются в кондукторе и заливаются расплавленным оловянно-свинцовым припоем. При этом все гелиевые каналы СП-кабелей модуля соединены через трубчатые керамические изоляторы 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. Для организации «теплого» линейного промежутка криогенно-магнитная система нуклотрона разбита на два полукольца, имеющих отдельные изоляционные вакуумные объемы.

Принципиальная электрическая схема соединения магнитов и линз нуклотрона приведена на рис. 27. Обмотки возбуждения магнитов и линз соединены в две электрические цепи и через токовводы и тиристорные ключи T_k подсоединены к источникам электропитания ИП1, ИП2. Силовые токовые цепи выполнены бифилярно, чтобы не вызывать рассеянных магнитных полей. Ток разбаланса при возбуждении фокусирующих и дефокусирующих квадрупольных магнитов создается источником ИП3 [27].

Общий вид криогенно-магнитных модулей дипольного и квадрупольного магнита нуклотрона приведены на рис. 28 и 29 [20].

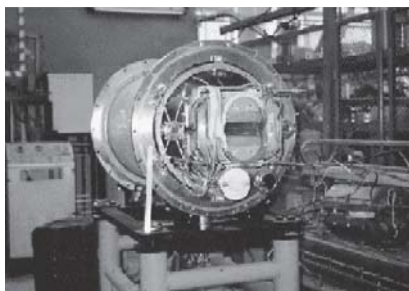


Рис. 28. Общий вид модуля дипольного магнита

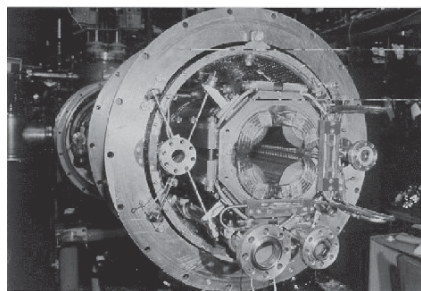


Рис. 29. Общий вид модуля квадрупольного магнита

10. КРИОСТАТИРОВАНИЕ МАГНИТОВ

В циркуляционных системах криостатирования сверхпроводящих магнитов большое значение имеет вопрос: что предпочтительнее использовать в качестве криоагента — жидкий гелий или двухфазный (парожидкостный) поток? В пользу криостатирования двухфазным гелием говорит следующее. Во-первых, при одинаковой температуре криостатирования энтальпия криоагента на входе в объект в случае однофазного гелия должна быть ниже, чем в случае двухфазного. Во-вторых, массовый расход криоагента, прокачиваемого через объект с фиксированным тепловыделением, в случае однофазного гелия больше, чем в случае двухфазного гелия. Причем эта разница тем больше, чем больше допустимое паросодержание в двухфазном потоке, и при допустимом паросодержании $x = 1$ массовые расходы могут отличаться на порядок и более. В-третьих, в случае криостатирования потоком двухфазного гелия существенно выше устойчивость сверхпроводящих обмоток к воздействию на них импульсных тепловых нагрузок большой мощности, например, из-за радиационного разогрева обмоток, обусловленного потерями частиц при ускорении и выводе.

Однако к моменту времени разработки первых модельных магнитов нуклотрона существовавший экспериментальный материал по изучению гидродинамики парожидкостного потока гелия был еще недостаточен для того, чтобы указать область допустимых значений параметров потока (паросодержание, удельный массовый расход, недогрев на входе, импульсная тепловая нагрузка и т.д.), обеспечивающих надежное криостатирование.

После серии исследований условий криостатирования на модельных магнитах в качестве криоагента был выбран парожидкостный поток гелия. На выбор двухфазного гелия оказало влияние и то, что для магнитов нуклотрона основная тепловая нагрузка приходится не на обмотку, а на железное ядро. При массовом паросодержании на выходе из магнита $x_2 = 0,9$ (см. рис. 25) паросодержание на выходе из обмотки $x_1 = 0,35$. Этот факт позволяет допустить значительный разброс в значениях гидравлического сопротивления и тепловой нагрузки охлаждающих каналов магнитов от их средних значений

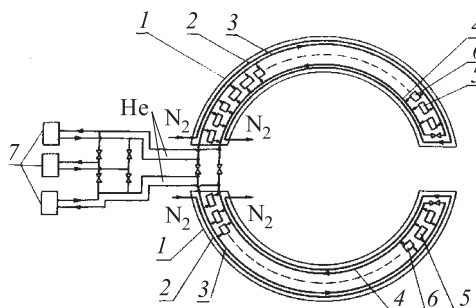


Рис. 30. Схема криогенных систем нуклотрона: 1 — вакуумный кожух; 2 — тепловой экран; 3 — питающий коллектор жидкого гелия; 4 — отводящий коллектор гелия; 5 — дипольный магнит; 6 — квадрупольная линза; 7 — рефрижератор

для всех магнитов ускорителя. Схема криостатирования магнитов нуклотрона приведена на рис. 30. Состыкованные между собой криостаты модулей образуют один, общий для каждой половины кольца ускорителя криостат. Внутри вакуумного кожуха (1) криостата расположен тепловой экран (2), питающий (3) и отводящий (4) гелиевые коллекторы, к которым параллельно подключены магниты (5), (6). Жидкий гелий из рефрижератора поступает в питающий коллектор криостата половины кольца ускорителя и распределяется по охлаждающим каналам отдельных модулей. В каждом модуле (см. рис. 25) парожидкостный поток гелия последовательно проходит охлаждающие каналы сверхпроводящих кабелей электрической связи соседних магнитов, обмотку магнита и после охлаждения питающего коллектора и железного ядра магнита поступает в отводящий коллектор. По мере прохождения каналов модулей и снятия тепловой нагрузки массовое паросодержание гелия меняется от 0 на входе в модуль до $\sim 0,9$ (в среднем для всех модулей половины кольца) на выходе из него. Температура потока гелия, поступающего в отводящий коллектор, контролируется термометром и характеризует условия охлаждения магнита.

Минимальное время охлаждения в сеансах работы 80-тонной криогенно-магнитной системы нуклотрона от 300 до 4,5 К составило 72 часа. Криостатирование магнитов устойчиво обеспечивается двумя гелиевыми рефрижераторами общей производительностью 3,2 кВт на уровне 4,5 К (третий — резервный), работающими параллельно [6,7].

11. ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ЭВАКУАЦИИ ЭНЕРГИИ ИЗ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ НУКЛОТРОНА В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ

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. Этот способ состоит в отключении источника электропитания (замыкания входных цепей и перевод источника питания в инверторный режим работы) и введении в цепь тока возбуждения сверхпроводящих магнитов активного сопротивления

(внешнего) гашения поля. Уравнение для такой цепи имеет вид

$$Ldi/dt + i[R_{\text{внеш}} + R_{\text{дин}}(t)] = 0,$$

где L — суммарная индуктивность цепочки сверхпроводящих магнитов, i — ток возбуждения магнитов на момент появления нормальной зоны, $R_{\text{дин}}$ — динамическое сопротивление участка сверхпроводящего кабеля, перешедшего в резистивное состояние, $R_{\text{внеш}}$ — сопротивление эвакуации энергии (гашения поля).

Так как $R_{\text{внеш}} \gg R_{\text{дин}}$ (активное внешнее сопротивление выбирается так, чтобы сопротивление участка с нормальной зоной составляло $3 \div 5\%$ от $R_{\text{внеш}}$), то его величина в основном и определяет характер экспоненциального спада тока и время вывода энергии из системы. При этом необходимо выбрать величину $R_{\text{внеш}}$ 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 ($u = R_{\text{внеш}}i$) были проведены 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 квадруполей, соединенных в единую цепь [21].

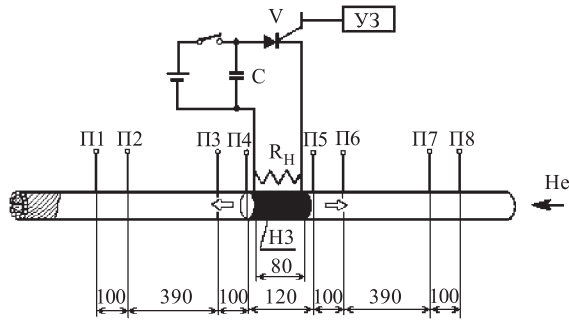


Рис. 31. Схема эксперимента: УЗ — устройство запуска тиристора, НЗ — нормальная зона, V — тиристор, $R_{\text{н}}$ — нагреватель, C — емкостный накопитель, П1÷П8 — потенциальные отводы

Схема эксперимента приведена на рис. 31. Предварительно заряженный конденсатор с помощью тиристора подключается к нагревателю, расположенному непосредственно на сверхпроводящем кабеле (вскрыта изоляция) внутреннего витка обмотки возбуждения дипольного магнита. По обе стороны

от нагревателя на определенном расстоянии располагались потенциальные отводы. От теплового импульса нагревателя зарождалась нормальная зона, которая распространялась вдоль кабеля, при этом ток возбуждения магнита составлял номинальную величину 6 кА. По осциллограммам напряжений с потенциальных концов, форме 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 СП-кабеля на резистивном участке при переходе из сверхпроводящего в нормальное состояние от величины напряжения на магните в момент начала эвакуации энергии: 38,8 В — 170 К; 28,8 В — 285 К; 23,2 В — 450 К.

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

В 1973 г. автором была предложена схема импульсного форсирования магнитного поля для двухэтапного ускорения ядер [22,23]. Она послужила прототипом схемы эвакуации энергии магнитов нуклотрона путем замены диодного ключа на тиристорный.

Принципиальная схема системы эвакуации энергии магнитного поля дипольных магнитов нуклотрона приведена на рис. 32.

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.

При нормальной работе с началом цикла работы ускорителя включаются пять тиристорных ключей T_k , образуя контур тока возбуждения I_0 (питания) магнитов от главной системы формирования магнитного цикла ускорителя СП. При эвакуации энергии по команде от датчиков обнаружения перехода сверхпроводящих магнитов в резистивное состояние включаются коммутационные тиристоры КТ пяти источников КИ, подключая предварительно заряженные от источников ЗИ конденсаторные батареи С к тиристорным T_k . Начинается быстрый процесс коммутации (десятки микросекунд) тока из тиристорных ключей T_k в конденсаторные батареи С. При изменении полярности напряжения на конденсаторных батареях С ток магнитов М коммутируется из конденсаторных батарей в цепи сопротивления гашения поля R_r через диоды Д. Начинается аварийная эвакуация энергии и экспоненциальный спад тока с постоянной времени $L/R_r = 0,18$ с (см. на рис. 32 эквивалентную схему эвакуации энергии из цепи дипольных магнитов нуклотрона).

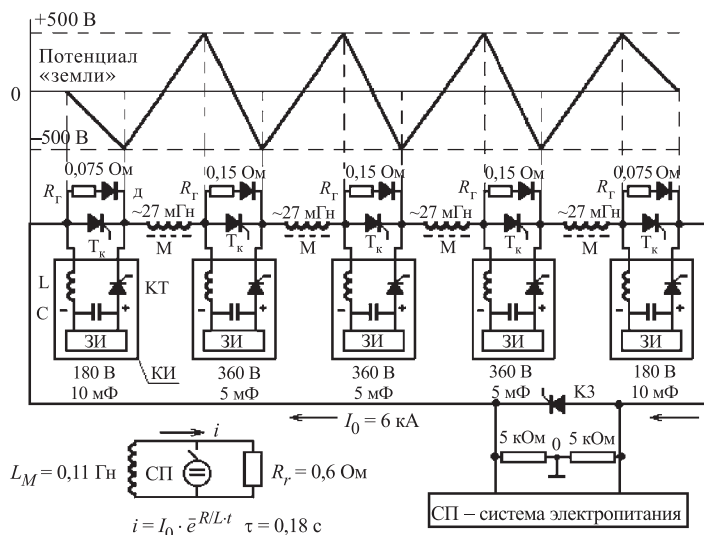


Рис. 32. Схема эвакуации энергии из дипольных магнитов нуклотрона и ее эквивалентная схема: Т_к — тиристорный ключ; Д — диод; ЗИ — зарядный источник; М — цепочка дипольных магнитов (24 магнита); КИ — импульсный источник коммутации тока; КЗ — тиристорный короткозамыкатель; КТ — коммутационный тиристор; С — коммутационная емкость; L — дроссель; R_г — сопротивление гашения поля

Эвакуация энергии из квадрупольных магнитов осуществляется с помощью двух тиристорных ключей, так как суммарная запасенная энергия в линзах примерно в четыре раза меньше (см. рис. 27).

На рис. 33 изображена зависимость от времени активной составляющей напряжения нормальной зоны в обмотке дипольного магнита, полученная из данных вышеприведенного эксперимента при токе на момент начала эвакуации, равном 6 кА.

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 проводники через резисторы 500 Ом (для предотвращения их пережигания при замыкании). Как показано на рис. 34, к ним подключаются входные цепи датчиков обнаружения нормальной фазы, образуя мостовую схему. При появлении нор-

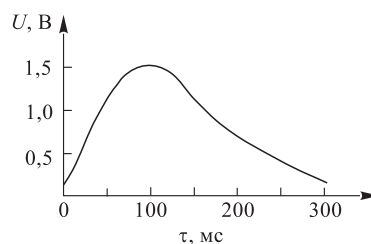


Рис. 33. Зависимость от времени изменения активной составляющей напряжения резистивной зоны в обмотке экспериментального магнита

мальной 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. Для включения защит проходят сигналы на входе датчиков, имеющие амплитуду более 50 мВ и длительность более 3 мс (уровень помех до 20–30 мВ).

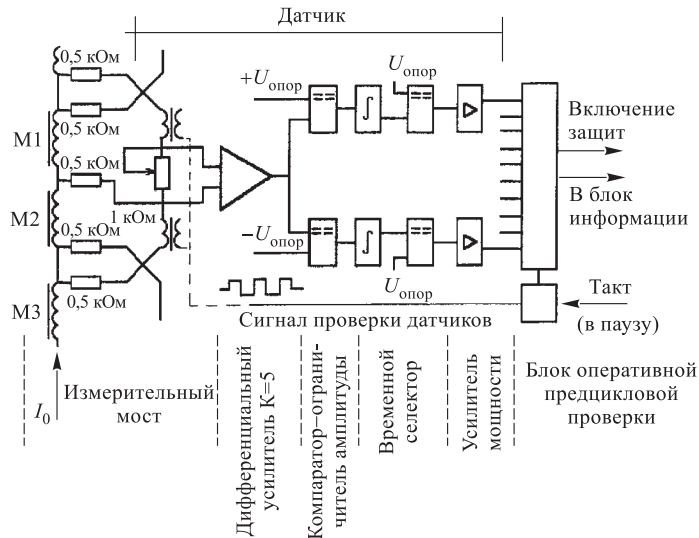


Рис. 34. Блок-схема датчика обнаружения перехода магнита в резистивное состояние (для двух магнитов)

Системой таких датчиков охватываются все сверхпроводящие магниты и соединительные кабели в цепи от токоввода до токоввода. Имеется вторая система так называемых «групповых датчиков», в которых плечи моста состоят из нескольких магнитов.

12. ПРИМЕНЕНИЕ 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 $8 \div 10$ МВт потребляемой мощности. Актуальная потребность в десятки раз снизить электропотребление привела к необходимости рассмотрения вопроса о расширении области применения магнитов типа «нуклотрон» 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. Индивидуальная подстройка токов возбуждения множества элементов магнитной оптики каналов привела бы к введению большого количества сильноточных тоководов, для охлаждения которых потребуются большие криогенные мощности. Сами магниты, возбуждаемые постоянным током, 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 тоководах. Опыт исследования режимов работы первых образцов магнитов с небольшими токами возбуждения с обмотками из сверхпроводящего кабеля трубчатого типа на примере сверхпроводящего инфлекторного септум-магнита нуклотрона показал экономическую эффективность и перспективность применения этих устройств [24]. Для обмоток этого магнита был изготовлен сверхпроводящий трубчатый кабель в модифицированном варианте.

Используемый сверхпроводящий кабель имел диаметр 0,5 мм, 2970 сверхпроводящих нитей из ниобий-титанового сплава НТ-50 диаметром 6 мкм, с шагом твиста 4-6 мм, был покрыт радиационно стойким изоляционным лаком «Имидаль» (возможна дополнительная хлопчатобумажная изоляция). В едином технологическом процессе на поверхность изолированной мельхиоровой трубки наносился слой термореактивного эпоксидного компаунда и с шагом 40 мм навивались 30 сверхпроводящих проводов и одна капроновая леска толщиной 0,5 мм; на сверхпроводящую проволоку затем наносилось изоляционное покрытие из полиимидной пленки шириной 20 мм и толщиной 40 мкм в один слой с 50 % перекрытием. Как и в стандартном трубчатом кабеле для магнитов нуклотрона, и с той же целью, в последующей операции навивался поперечный бандаж из нихромового провода (в других устройствах применялись капроновая леска, нитки).

Заканчивалось изготовление трубчатого кабеля нанесением двухслойного покрытия стеклотенты, пропитанной эпоксидным компаундом. 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 пропаанной скруткой (ПОС-60), образуя 300-витковую обмотку возбуждения с номинальным током $200 \div 250$ А. При этом провода начала и конца такой многовит-

ковой обмотки разделялись капроновой леской, заложенной в кабеле при его изготовлении (между ними наибольшее напряжение при эвакуации энергии).

Для охлаждения сверхпроводящих проводов в местах сая скрутка наматывалась на изолированную полиимидной лентой трубку охлаждения кабеля и прижималась изоляционным ленточным покрытием (рис. 35,а). В этой конструкции обмотки сверхпроводящие токнесущие провода охлаждаются косвенно через изоляционные покрытия. Так как при возбуждении постоянным током вихревые тепловыделения в сверхпроводнике практически отсутствуют, косвенный способ криостатирования оказался вполне приемлемым. Необязательно и применение мелкодисперсных сверхпроводящих проводов в конструкции кабеля и мельхиоровой трубки, предпочтительнее применение медной, с толщиной стенки ~ 1 мм. В этой конструкции магнита трубка кабеля для прокачки гелия электрически изолирована от сверхпроводящих проводов. 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 (рис. 35,б).

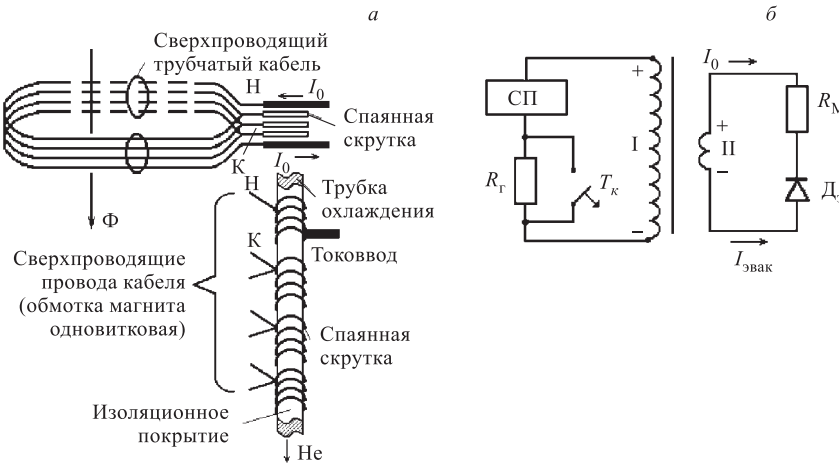


Рис. 35. а) Электрическая схема соединения сверхпроводящих проволок кабеля обмотки магнита канала транспортировки частиц; б) схема эвакуации энергии: I — обмотка возбуждения магнита; II — контур тока эвакуации; R_M — сопротивление медной трубки кабеля; T_k — тиристорный ключ; СП — система электропитания

Опыт испытаний и успешная эксплуатация в сеансах работы нуклотрона убедительно подтвердили состоятельность рассматриваемых конструкций магнитов, работающих с постоянными токами возбуждения. По этому принципу

были сделаны и испытаны на стенде квадрупольные и секступольные линзы для системы медленного вывода пучка из нуклотрона.

Для возбуждения магнитов с применением новой технологии требуются источники электропитания малой мощности ~ 1 кВт (5 В, 200 А). В сравнении с ними источники питания магнитов и линз каналов транспортировки частиц от синхрофазотрона к физическим установкам в экспериментальном павильоне ЛВЭ ОИЯИ имеют выходные мощности ~ 400 кВт (110 В, 4000 А, 25 шт.) и 220 кВт (220 В; 1000 А, 10 шт.). Опыт работы магнитной системы нуклотрона показал, что параллельное криостатирование многих сверхпроводящих магнитов прокатного типа от сборных коллекторов протяженностью в сотни метров — вполне осуществимая и технически решаемая задача.

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

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

13. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ЛВЭ ОИЯИ разработана новая концепция сверхпроводящей магнитной системы для ускорителей синхротронного типа на основе магнитов с магнитопроводами традиционных «теплых» конструкций, отличающихся новизной исполнения обмотки возбуждения из трубчатого сверхпроводящего кабеля, специально созданного для работы в импульсных магнитных полях. Конструкция магнитов позволила применить выгодный и эффективный способ криостатирования, основанный на циркуляции двухфазного гелия по каналу кабеля обмотки и трубкам охлаждения магнитопровода.

Новая технология в принципе упростила проблему применения сверхпроводимости в ускорительной технике, привнесла в конструкцию магнитной системы элементы миниатюризации, простоты изготовления и эксплуатационной надежности, экономической эффективности и др.

Важным отличительным признаком ускорителя со сверхпроводящей магнитной системой нового типа является его способность работать с длительностью рабочего цикла порядка секунд и иметь нижний предел динамического рабочего диапазона изменения магнитного поля при ускорении частиц $\sim 0,02$ Тл (понижение энергии инжектируемых частиц).

2. Впервые разработан, исследован и реализован в обмотках магнитов нуклотрона трубчатый сверхпроводящий кабель на основе выпускаемых промышленностью компонентов, для работы в импульсных магнитных полях с

малыми тепловыделениями при скоростях изменения поля порядка ~ 4 Тл/с, с радиусом изгиба до 20 мм.

3. На базе изобретенного трубчатого сверхпроводящего кабеля разработаны, исследованы и реализованы в магнитной системе нуклотрона новые по типу сверхпроводящие отклоняющие и фокусирующие магниты циркуляционного типа с максимальным полем до $1,8 \div 2$ Тл, работающие с рекордной цикличностью для сверхпроводящих систем до 1 Гц. Конфигурация и однородность магнитного поля в них определяется формой полюсов магнитопровода по аналогии с «теплыми» системами.

4. На основании проведенных исследований разработан и реализован проект криогенно-магнитной системы ускорителя релятивистских ядер — нуклотрона, призванного заменить синхрофазотрон и существенным образом модернизировать ускорительную базу ОИЯИ, предоставить возможность на современном уровне проводить физические эксперименты.

5. Осуществлен ввод в действие нуклотрона — первого сверхпроводящего синхротрона, сооруженного на малогабаритных сверхпроводящих магнитах нового типа с ферромагнитными сердечниками и трубчатыми сверхпроводящими обмотками. Проведено семнадцать сеансов работы по его наладке и освоению в физических экспериментах с внутренними тонкими мишенями и на пучках медленного вывода в экспериментальный павильон.

6. Проведены исследования процессов образования нормальной зоны в трубчатом сверхпроводящем кабеле обмоток новых магнитов 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.

7. 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 [25].

8. Разработана экономически эффективная концепция и необходимые при ее реализации технические решения для создания сверхпроводящих элементов магнитной оптики для каналов транспортировки частиц ускорителей с малыми постоянными токами возбуждения (~ 200 А) на основе конструкции магнитов нуклотрона. Разработана и реализована конструкция трубчатого сверхпроводящего кабеля с электрически изолированными сверхпроводящими проводами (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 пучка из нуклотрона.

9. Использование в конструкции электромагнита сверхпроводящей трубчатой обмотки позволяет перевести рабочую температуру железного ярма на азотный или «комнатный» уровень, теплоизолировав обмотку от железа, и тем самым значительно снизить общие тепловые потери и охлаждаемую массу на уровне 4,5 К. По независимой оценке американских специалистов, занимающихся с 1995 года разработкой протонного коллайдера 2×100 ТэВ в Национальной лаборатории им.Ферми, магниты типа «нуклотрона» в этом варианте являются наиболее перспективными по сравнению с другими конструкциями [26].

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить глубокую признательность коллегам по работе, которые на различных этапах выполнения программы сооружения магнитной системы нуклотрона и систем ее обеспечения своим творческим трудом способствовали выполнению этой огромной работы, завершившейся запуском первого сверхпроводящего ускорителя релятивистских ядер в России в 1993 году.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Балдин А.М. и др.** — Сообщение ОИЯИ 9-7148, Дубна, 1973.
2. **Балдин А.М. и др.** — В сб.: Труды четвертого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1974 г. Том II, с.4–8.
3. **Балдин А.М. и др.** — В сб. «Предложения по программе Лаборатории высоких энергий в 1991–1995 гг.». ОИЯИ P1,2-89-631, Дубна, 1989, с.210
4. **Agarov N.N. et al.** — Cryogenics, 1980, v.20, No.6, p.345 (Препринт ОИЯИ P8-12786, Дубна, 1979).
5. **Smirnov A.A. et al.** — Journal de Phys., 1984, v.45, Coll.C1, suppl. N1, p.C1-279. (Препринт ОИЯИ 9-83-625, Дубна, 1983).
6. **Baldin A.M. et al.** — JINR Preprint E9-93-273, Dubna, 1993.
7. **Baldin A.M. et al.** — JINR Comm. E8-95-65, Dubna, 1995.
8. **Дьячков Е.И. и др.** — Сообщение ОИЯИ 8-82-169, Дубна, 1982.
9. **Зайцев Н. и др.** — Авт. свид. СССР, № 1424609, 1986.
10. **Анищенко Н.Г. и др.** — Физика элементарных частиц и атомного ядра, 1988, т.19, вып.3, с.669.
11. **Chovanec F. et al.** — Cryogenics, 1981, v.21, No.8, p.559. Препринт ОИЯИ P8-80-575, Дубна, 1980.
12. **Борисовская З.В. и др.** — Сообщение ОИЯИ 9-86-714, Дубна, 1986.
13. **Baldin A.M. et al.** — IEEE Trans. on Nucl. Science, 1983, v.NS-30, No.4, p.3247.

14. **Донягин А.М. и др.** — Сообщение ОИЯИ Р9-94-329, Дубна, 1994
15. **Baldin A.M. et al.** — IEEE Trans. on magnetics, 1996, v.32, No. 4; Сообщение ОИЯИ Р9-95-260, Дубна, 1995.
16. **Baldin A.M. et al.** — IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, 1995, v.5, No. 2, part I, p.875.
17. **Допуагин А.М. et al.** — In: Proc. of the 5th Europ. Part. Accelerator Conference, 1996, v.3, p.2281, Sitges (Barcelona).
18. **Васильев П.Г. и др.** — Сообщение ОИЯИ Р9-83-394, Дубна, 1983.
19. **Борисовская З.В. и др.** — Сообщение ОИЯИ 9-88-25, Дубна, 1988.
20. **Смирнов А.А. и др.** — Сообщение ОИЯИ 9-88-344, Дубна, 1988.
21. **Дьячков Е.И. и др.** — Сообщение ОИЯИ 9-89-467, Дубна, 1989.
22. **Казанский Г.С. и др.** — Журнал технической физики, 1975, т.XLV, вып.2, с.337.
23. **Смирнов А.А.** — Авт. свид. СССР, №469592, 1973.
24. **Акишин П.Г. и др.** — В сб.: Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1992, том 2, с.239.
25. **Омельченко Б.Д. и др.** — Препринт ОИЯИ Р9-98-213, Дубна, 1998.
26. **Foster G.W. et al.** — Fermilab Report ТМ-1976, 1996.
27. **Bartenev V.D. et al.** — Cryogenics, 1991, v.31, p.985.
28. CERN Accelerator School Magnetic Measurement and Alignment. Hyatt Conference Centre, Montreux, Switzerland, 16-20 March, 1992. CERN 92-05 1992.