

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9-95-260

А.М.Балдин, Н.Н.Агапов, С.А.Аверичев, Н.Г.Анищенко,
В.Д.Бартенев, Н.А.Блинов, В.Я.Волков, И.Н.Гончаров,
В.И.Дацков, А.М.Донягин, Е.И.Дьячков, И.Б.Иссинский,
А.Д.Коваленко, Ю.В.Куликов, В.Н.Кузичев, Л.Г.Макаров,
В.А.Михайлов, Д.Рихтер, А.А.Смирнов, А.Ю.Стариков,
Г.Г.Ходжибагян, Ю.А.Шишов

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МУЛЬТИПОЛЬНЫЕ
КОРРЕКТОРНЫЕ МАГНИТЫ ДЛЯ НУКЛОТРОНА

VOL 2 № 04

1995

**We regret that
some of the pages
in the microfiche
copy of this report
may not be up to
the proper legibility
standards, even
though the best
possible copy was
used for preparing
the master fiche**

Введение

В кольце пуклотрона размещено 28 мультипольных корректоров (МПК) с 3 и 4-мя типами обмоток в каждом [1]. В МПК входят дипольные (Д – прямые и косые), квадрупольные (К – прямые и косые), секстипольные (С – прямые) и октупольные (О – прямые) обмотки в различных сочетаниях. Каждая обмотка МПК имеет индивидуальное электропитание. МПК механически соединен с основной сильноточной квадрупольной линзой и имеет с ней общие каналы для прокачки гелия.

1 Конструкция мультипольных корректоров

Основные параметры МПК представлены в таблицах 1 и 2 и на рис. 1. Все обмотки навиты в один слой многожильным проводом диаметром 0,5 мм, кроме секстипольной, имеющей два слоя. Для обмоток МПК пуклотрона аналогично с обмоткам [2] применено косвенное криостатирование. Однако удельная (на единицу теплопередающей поверхности) мощность динамических тепловыделений в МПК пуклотрона для планируемого цикла ускорения 1 Гэ существенно выше. Обмотки 3 (см. рис.2) пропитаны эпоксидным компаундом и приклеены к трубчатому теплообменнику 2, по которому циркулирует двухфазный гелий. Мельхиоровая трубка 2 диаметром 5×0.5 мм навит на обечайку 1, изготовленную из стали марки 1X18H10T, и прикреплена к ней прерывистой пайкой. Обечайка для уменьшения джоулевых потерь снабжена продольными вырезами. Поверхность змеевика выровнена на токарном станке с помощью ролика, затем покрыта стеклотканью с эпоксидным компаундом. После полимеризации полученная поверхность проточена до диаметра 147 мм, причем минимальная толщина электронизолирующего слоя равна 0,3 мм.

Обмотки окружены шихтованным магнитопроводом 4 из стали марки Э-310, толщина листов железа равна 0,5 мм. Листы скреплены между собой с помощью приваренных к ним стальных накладок. Криостатирование магнитопровода осуществляется посредством медных трубок 5, припаянных к железу и имеющих канал диаметром 4 мм для прокачки кипящего гелия.

2 Токовводы и система охлаждения

Особенность токовводов МПК состоит в том, что они не охлаждаются газообразным гелием. Это позволило исключить сложную систему сбора гелия и регулирования его потоков и таким образом упростить эксплуатацию МПК. Токовводы имеют тепловые "якори" на уровнях температуры 80 и 4,5 К. Параметры токовводов даны в таблице 3, конструкция показана на рис. 2. Тепловой "якорь" представляет собой пакет спаянных между собой прямоугольных

Таблица 1: Параметры магнитов

Параметр	Знач.
Внутр. диам. каркаса, мм	132
Внутр. диам. обмотки, мм	147
Длина обмотки, мм	310
Макс. рабочий ток, А	100
Обмотки	Д/С/О:
Макс. поле на полюсе, Тл	0,15 / 0,4 / 0,1
Число ампер-витков, кА	9 / 8,2 / 1,5

Таблица 2: Параметры проводника

Параметр	Знач.
Диам. без изоляции, мм	0,5
Диам. в изоляции, мм	0,53+0,05
Отношение Cu/NbTi	1,38
Число NbTi жил	1045
Крит. ток (4,5 К; 1 Тл), А	350

пластин 1-4, в том числе из фольгированного медью с двух сторон стекло-текстолита. Пластины 4 припаяны к азотному (80 К) экрану пучкотрона или гелиевому эмсевику 5 (4,5 К). Дополнительный слой медной фольги 1 обеспечивает необходимую токонесущую способность "якоря".

Токоведущая часть токоввода (кроме "якорей") состоит из гибкого жгута медных проводов. Соотношение длины l и площади поперечного сечения S жгута выбрано оптимальным для обеспечения минимальных теплопритоков q при 80 и 4,5 К. Согласно данным работы [5] в диапазоне температур 290-77 К для медных токовводов:

$$\frac{l}{S} \times I \approx 3,4 \times 10^6, \text{ А} \times \text{м}^{-1}; \quad q \approx 0,04, \text{ Вт} \times \text{А}^{-1},$$

где l — максимальный рабочий ток (здесь принято $l=100$ А).
Для диапазона температур 77-4,5 К:

$$\frac{l}{S} \times I = 10^7, \text{ А} \times \text{м}^{-1}; \quad q = 0,0085, \text{ Вт} \times \text{А}^{-1}.$$

Для предотвращения электрического пробоя по краям "якоря" фольга вытравлена с токовой стороны по контуру пластины на ширине 4 мм. Этот промежуток выдерживает в вакууме 10^{-5} мм рт. ст. напряжение >500 В.

Таблица 3: Параметры токовводов

Параметр		Значение	
		300-80К	80-1,5К
Длина шины,	мм	600	550
Площ. попер. сеч.,	мм ²	15	5
Тепловой "якорь":			
Длина,	мм	130	148
Ширина,	мм	94	104
Площ. попер. сеч. проводника,	мм ²	14	16
Толщ. изолятора,	мм	0,4	
Толщ. фольги,	мкм	50	
Теплоприток (расч. на 1 токоввод):			
при 100 А,	Вт	4	0,85
без тока,	Вт	2,1	0,25

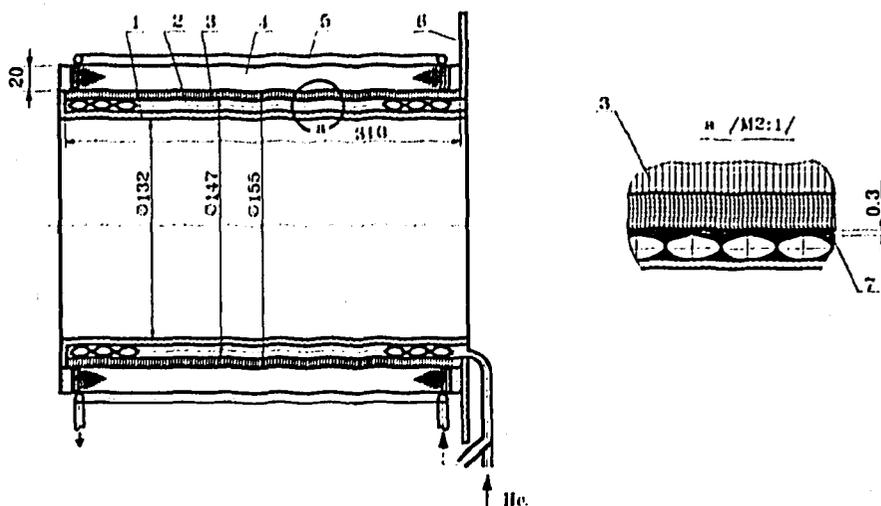


Рис. 1. Мультиполюсный коррекционный магнит: 1-опорная обечайка; 2-трубчатый теплообменник с двухфазным гелием; 3-сверхпроводящие обмотки; 4-магнитопровод; 5-теплообменник на магнитопроводе; 6-фланец для крепления контактных соединений сверхпроводника; 7-электрическая изоляция

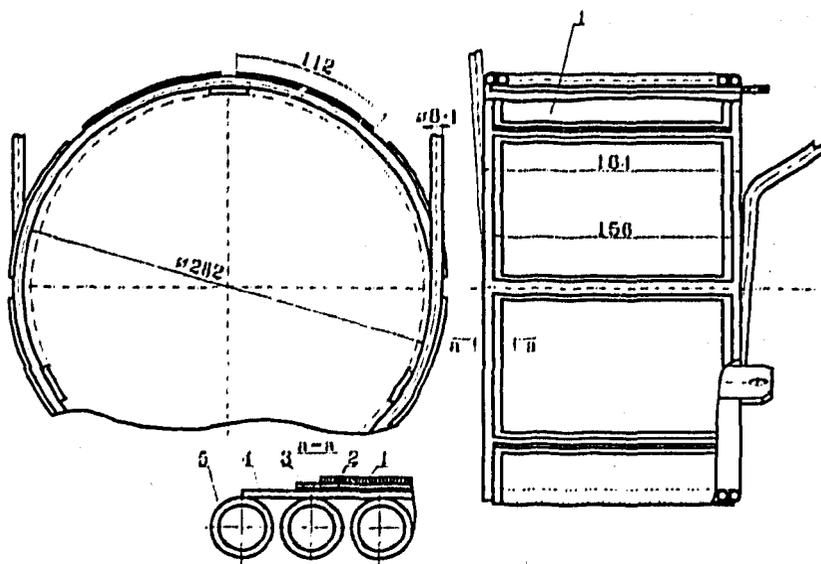


Рис. 2. Тепловые "якря" токовводов: 1-дополнительная медная фольга; 2-фольги диэлектрика; 3-диэлектрик; 4-теплопроводная пластина (медь); 5-трубчатый теплообменник (медь)

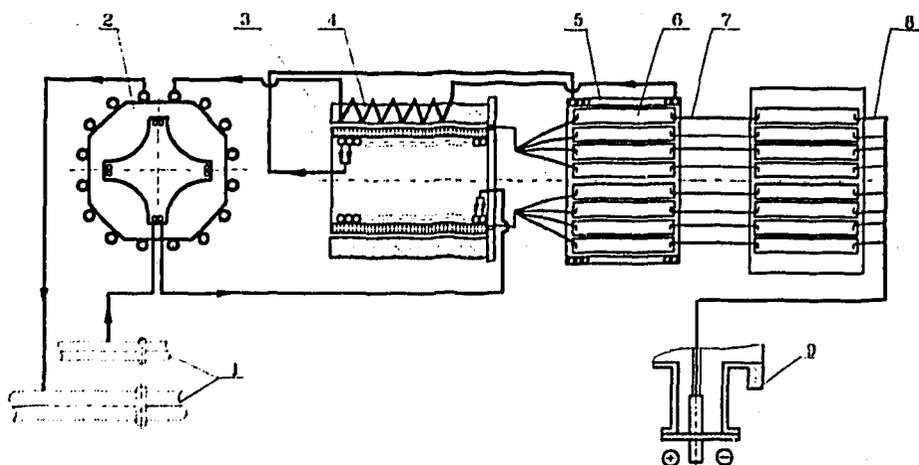


Рис. 3. Схема криостатирования квадрупольной линзы и МПК: 1-прямой и обратный гелиевые коллекторы; 2-силыоточная квадрупольная линза; 3-блок МПК; 4-магнитопровод; 5-трубчатый теплообменник; 6-токоведущие пластины тепловых "якорей"; 7,8-токоведущие провода; 9-вакуумный сосуд

Измерена поперечная теплопроводность λ образцов фольгированных изоляторов в исходном состоянии и после нагрева, соответствующего температуре пайки. Для марки СФТ-2-0,5 при 5 К $\lambda \approx 0,04 \text{ Вт} \times \text{м}^{-1} \times \text{К}^{-1}$, для марки СВЧ (Al_2O_3 , толщина 1,2 мм, толщина фольги 33 мкм) $\lambda \approx 0,03 \text{ Вт} \times \text{м}^{-1} \times \text{К}^{-1}$. С ростом температуры теплопроводность значительно возрастает. Для фольгированного стеклотекстолита с толщиной изолятора 170 мкм величина λ изменяется от $0,04 \text{ Вт} \times \text{м}^{-1} \times \text{К}^{-1}$ при 5 К до $0,2 \text{ Вт} \times \text{м}^{-1} \times \text{К}^{-1}$ при 30 К. Помимо измерена теплопроводность стали марки Э-310 при температуре 6 К, которая составила $0,68 \text{ Вт} \times \text{м}^{-1} \times \text{К}^{-1}$.

Выяснилось, что длительный нагрев до температуры $\sim 200^\circ \text{С}$, соответствующей пайке припоем ПОС-50, приводит к вспучиванию фольги и резкому уменьшению теплопроводности. Вместе с тем пайка более легкоплавкими припоями была бы менее надежна и долговечна, равно как и клеевые соединения деталей "якоря". Выход был найден в кратковременном нагреве (несколько секунд) до 200°С . Косвенно о допустимости кратковременного нагрева свидетельствует то, что прочность на отслаивание фольги стеклотекстолита марки СФ-2-50 не изменяется после воздействия теплового удара в течение 10 с при 260°С [6].

Расчетная средняя разность температур между токоведущей частью теплового "якоря" и поверхностью теплообменника при 4,5 К равна $\sim 1 \text{ К}$.

Питание гелием МПК, магнитопровода и теплового "якоря" идет последовательно с квадрупольной линзой, навитой трубчатым сверхпроводником [1] (см. рис. 3). Гидравлическое сопротивление этого тракта подобрано таким образом, чтобы обеспечить поток гелия, необходимый для снятия статических и динамических тепловыделений из линзы и блока МПК с тоководами. Линза с блоком МПК подключена параллельно с другими линзами и диполями нуклотрона [1] к питающему и отводящему гелиевым коллекторам. Массовое паросодержание в потоке двухфазного гелия на выходе из дипольных и квадрупольных магнитов нуклотрона составляет примерно 0,9.

3 Результаты испытаний

Для проверки работоспособности МПК, надежности и долговечности приклейки были изготовлены и испытаны полномасштабная модель [3],[4] и опытный МПК. Вся серия из 28 шт. МПК успешно прошла стендовые рабочие испытания. Опытный образец и серийные МПК работали устойчиво вплоть до тока 150 А. Измерена радиальная теплопроводность обмотки, которая при температуре 8 К составляет $0,05 \text{ Вт} \times \text{м}^{-1} \times \text{К}^{-1}$. Динамические тепловыделения в четырех обмотках МПК при "треугольном" цикле с временами подъема и спада тока по 1 с и максимальным током 100 А составляют 2,6 Вт. Теплоприток к гелиевому "якорю" при $I=100 \text{ А-const.}$ равен 1,1 Вт на 1 ввод, из них 0,7 Вт на 1 ввод — статический теплоприток по токовводу.

4 Выводы

Создан комплекс мультиполюсных магнитов для нуклотрона. Впервые принцип косвенного криостатирования применен для магнитов и тоководов одновременно и в больших масштабах, что позволило отказаться от сложной системы сбора гелия из многочисленных тоководов и упростить эксплуатацию МПК. Разработаны оригинальные технологии изготовления и конструкции МПК и тепловых "якорей" тоководов.

Список литературы

- [1] A.M.Baldin, N.N.Agarov, V.A.Belushkin et al., Cryogenic System of the Nuclotron — a New Superconducting Synchrotron. Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 39A, Plenum press, New York and London, 1994, pp. 501-508
- [2] D. Ciasynski, P. Mantsch, IEEE, Vol.NS-28, N3, 1981, p.3275
- [3] П.Г.Алищенко, В.Д.Бартенев, Н.А.Блинов и др., Депоирированная публикация ОИЯИ, Б2-9-88-611, Дубна, 1988.
- [4] П.Г.Алищенко, В.Д.Бартенев, Н.А.Блинов и др., Модель сверхпроводящего мультиполюсного корректора нуклотрона. Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. т. II, с.221-223. N Д9-89-52, издат. ОИЯИ, Дубна, 1989.
- [5] И.А.Глебов, В.П.Шахтарин, Ю.Ф.Антонов, Проблема ввода тока в сверхпроводниковые устройства. Л.: Наука (Ленинградское отделение), 1985, табл. 2.3, с.49.
- [6] В.Б.Березин и др., Электротехнические материалы. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1983, с. 151.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 июня 1995 года.

Издательский отдел
Объединенного института ядерных исследований
предлагает Вам приобрести перечисленные ниже книги:

Индекс книги	Название книги
E7-93-274	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1993 г. 2 тома. 498 и 590 с. (в твердом переплете) (на англ. яз.)
D14-93-325	Труды рабочего совещания «Нейтронный активационный анализ в охране окружающей среды». Дубна, 1992. 520 с. (на русском и англ. яз.)
D1,9,13-93-459	Труды 2-го рабочего совещания по С-тау фабрике в ОИЯИ. Дубна, 1993. 266 с. (на русском и англ. яз.)
E7-94-19	Труды Международной конференции «Динамические аспекты деления ядер». Смоленице, 1993 г. 318 с. (на англ. яз.) Книга В.С.Барашенкова «Сечения взаимодействия частиц и ядер с ядрами». 1993 г. 346 с.
94-55	Боголюбовские чтения. Материалы Международного совещания. Дубна, 1993 г. 216 с. (на русском и англ. яз.)
E2-94-95	Труды Международного симпозиума «Дубна. Дейтрон-93». Дубна, 1993, 390 с. (на англ. яз.)
P11-94-100	Труды Международного совещания по программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1993. 148 с. (на русском яз.)
P2-94-150	Труды VI семинара «Гравитационная энергия и гравитационные волны». Дубна, 1993, 160 с. (на русском яз.)
D14-94-269	Тезисы докладов 30-го совещания по физике низких температур. Дубна, 1994, 2 тома по 300 стр. (на русском и англ. яз.)
E7-94-270	Труды Международного рабочего совещания «Физические эксперименты и первые результаты на накопительных кольцах тяжелых ионов». Смоленице, 1992. 324 с. (на англ. яз.)
E13-94-290	Тезисы докладов 17-й Международной конференции по трекам ядер в твердых телах. Дубна, 1994. 296 с. (на англ. яз.)

Индекс книги	Название книги
E2-94-347	Труды Международной конференции «Методы симметрии в физике». Дубна, 1993. 602 с. (2 тома, на англ. яз.)
E4-94-370	Труды IV Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра. Дубна, 1994. 412 с. (на англ. яз.)
E17-94-386	Труды 6-го германско-российско-украинского семинара по высокотемпературной сверхпроводимости. Дубна, 1994, 340 с. (на англ. яз.)

За дополнительной информацией просим обращаться в издательский отдел ОИЯИ по адресу:

141980 г. Дубна Московской области,
ул. Жолио-Кюри, 6,
Объединенный институт ядерных исследований,
Издательский отдел
E-mail: adm@pubd.jinr.dubna.su.

Балдин А.М. и др.
Сверхпроводящие мультиполярные корректорные
магниты для нуклотрона

P9-95-260

В ОИЯИ (Дубна) введен в действие сверхпроводящий ускоритель нуклотрон. Кольцо ускорителя содержит 28 мультиполярных корректорных магнитов с внутренним диаметром 132 мм. Каждый магнит состоит из трех или четырех типов обмоток, навитых в один или два слоя из Nb-Ti многожильного проводника. Обмотки пропитаны эпоксицианакрилатом и приклеены к трубчатому теплообменнику с двухфазным гелием, прокачиваемым при 4,5 К. Каждая обмотка магнита имеет индивидуальную (100 А) тоководы без охлаждения газообразным гелием. Это значительно упрощает систему сбора газообразного гелия в ускорителе. Все магниты испытаны и установлены в ускоритель.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1995

Перевод авторов

Baldin A.M. et al.
Superconducting Multipole Correction Magnets
for the Accelerator Nuclotron

P9-95-260

The superconducting accelerator Nuclotron was put into operation at JINR, Dubna. The accelerator ring comprises 28 multipole correction magnets with an inner diameter of 132 mm. Each magnet consist of 3 or 4 types of the windings with one or two layers from Nb-Ti multifilament conductor. The windings are impregnated with epoxy resin compound and glued on the tube coil with two-phase helium. Each winding has individual 100 A current leads without helium gas cooling. This very much simplifies the system of helium gas collection at the accelerator. All the magnets were tested and installed in the accelerator.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1995

Редактор Е.В.Калинишникова. Макет Н.А.Киселевой

**Подписано в печать 14.09.95
Формат 60×90/16. Офсетная печать. Уч.-изд.листов 0,43
Тираж 320. Заказ 48553. Цена 258 р.**

**Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области**