



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

95-260

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

1995

Введение

В кольце нуклотрона размещено 28 мультиполюсных 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), секступольные (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 мультиполюсных 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 секступольной, имеющей два слоя. Для обмоток МПК нуклотрона аналогично с обмотками [2] применено косвенное криостатирование. Однако удельная (на единицу теплопередающей поверхности) мощность динамических тепловыделений в МПК нуклотрона для планируемого цикла ускорения 1 Гц 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 навита 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 электроизолирующего 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

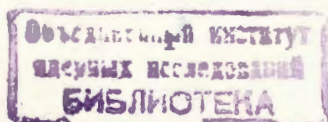


Таблица 1: Параметры магнитов

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 стеклотекстолита. Пластины 4 припаяны к азотному (80 К) экрану пуклотрона или гелиевому змеевику 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 I — максимальный рабочий ток (здесь принято $I=100$ 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	80-4,5К
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

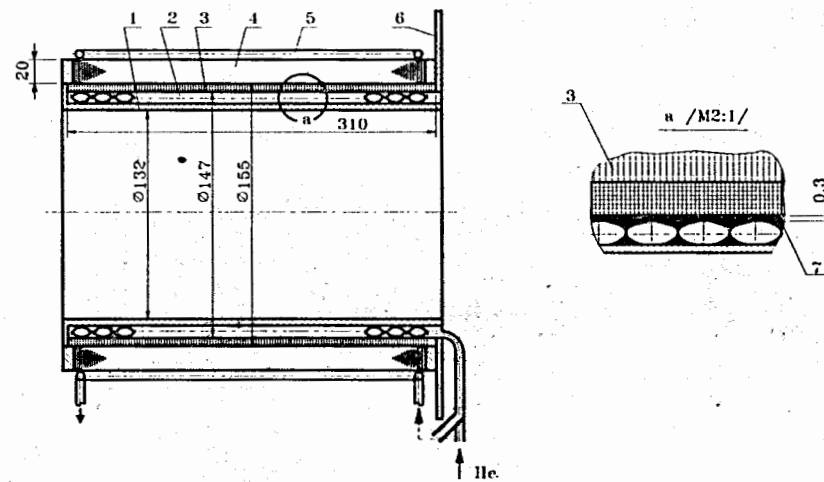


Рис. 1. Мультиполюсный корректорный магнит: 1-опорная обечайка; 2-трубчатый теплообменник с двухфазным гелием; 3-сверхпроводящие обмотки; 4-магнитопровод; 5-теплообменник на магнитопроводе; 6-фланец для крепления контактных соединений сверхпроводника; 7-электрическая изоляция

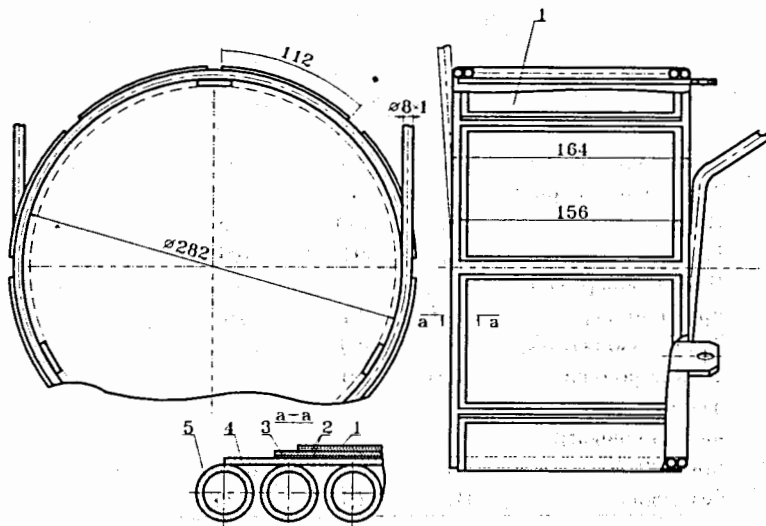


Рис. 2. Тепловые "якоря" токовводов: 1—дополнительная медная фольга; 2—фольги диэлектрика; 3—диэлектрик; 4—теплопроводная пластина (медь); 5—трубчатый теплообменник (медь)

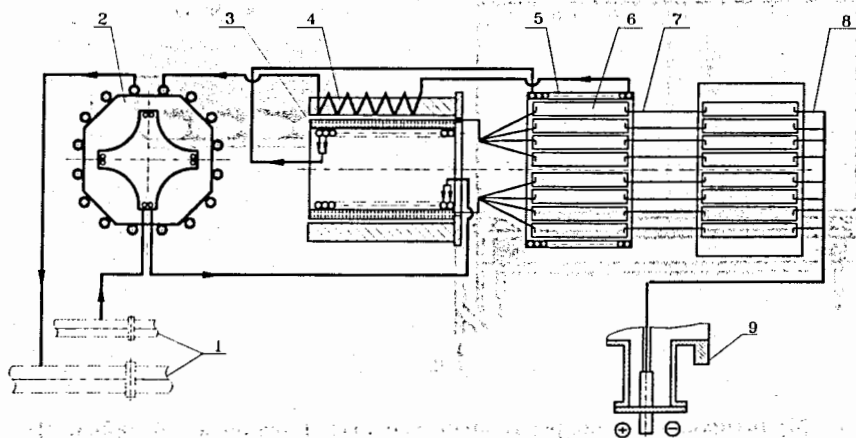


Рис. 3. Схема криостатирования квадрупольной линзы и МПК: 1—прямой и обратный гелиевые коллекторы; 2—сильноточная квадрупольная линза; 3—блок МПК; 4—магнитопровод; 5—трубчатый теплообменник; 6—токоведущие пластины тепловых "якорей"; 7, 8—токоведущие провода; 9—вакуумный сосуд

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. Попутно 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 пуклотрона [1] к питающему и отводящему гелиевым коллекторам. Массовое паросодержание в потоке двухфазного гелия на выходе из дипольных и квадрупольных магнитов пуклотрона 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 технология изготовления и конструкции МПК и тепловых "якорей" тоководов.

Список литературы

- [1] A.M.Baldin, N.N.Agapov, 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] Н.Г.Анищенко, В.Д.Бартепов, Н.А.Блинов и др., Депонированная публикация ОИЯИ, Б2-9-88-611, Дубна, 1988.
- [4] Н.Г.Анищенко, В.Д.Бартепов, Н.А.Блинов и др., Модель сверхпроводящего мультиполюсного корректора пуклотрона. 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.Н.Шахтарин, Ю.Ф.Антопов, 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.