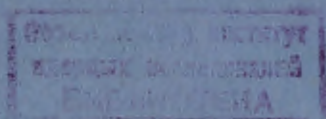


объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна



9-83-625

А.А.Смирнов, А.М.Балдин, А.А.Васильев,  
М.А.Воеводин, А.М.Донягин, Е.И.Дьячков,  
И.А.Елисеева, А.Г.Зельдович, А.Д.Коваленко,  
В.Н.Кузичев, Ю.В.Куликов, Б.К.Курятников,  
Е.К.Курятников, Л.Г.Макаров, П.И.Никитаев,  
Н.М.Сазонов, Г.Г.Ходжибагян, И.С.Хухарева

ИМПУЛЬСНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ  
ДИПОЛЬНЫЙ МАГНИТ ДЛЯ НУКЛОТРОНА

Направлено на 8-ю Международную конференцию  
по магнитной технологии  
/Гренобль, сентябрь 1983 г./  
и на 2-ю Всесоюзную конференцию  
по техническому использованию сверхпроводимости  
/Ленинград, сентябрь 1983 г./

1983



## ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводящий ускоритель релятивистских ядер нуклотрон<sup>/1,2/</sup> призван заменить в будущем синхрофазотрон ОИЯИ. Основное кольцо будущего ускорителя с периметром 250 м планируется разместить в существующем здании ускорителя, что значительно сократит капитальные затраты и время его сооружения. При этом на стадии выбора типа магнитной системы нуклотрона к ней предъявлялись следующие основные требования:

1/ соответствие параметров ускорителя  $E = 6$  ГэВ/нукл., интенсивность  $\sim 10^9$  част./цикл для  $U^{82+}$  поставленным физическим задачам. Режим предельной фрагментации ядер, соответствующий "размораживанию" кварковых степеней свободы, начинается при энергии 4 ГэВ/нукл./3/;

2/ сооружение нового и замена им старого ускорителя в сжатые сроки;

3/ экономичность /минимальные затраты на сооружение и эксплуатацию/;

4/ простота в изготовлении и обслуживании;

5/ высокая надежность.

При выборе магнитной системы были рассмотрены четыре типа магнитов:

а/ традиционные "теплые" магниты;

б/ сверхпроводящие магниты<sup>/4/</sup> с большим  $\sim 5$  Т/ полем;

в/ сверхпроводящие магниты<sup>/5/</sup> погружного типа с полем  $\sim 2$  Т/ формируемым железом;

г/ магниты<sup>/6,7/</sup> прокачного типа с полем  $\sim 2$  Т/, формируемым железом, и обмоткой из трубчатого сверхпроводника.

Наши разработки и исследования последних лет показывают, что указанным требованиям в наибольшей степени отвечает магнитная система из магнитов с полем, формируемым железом, и обмоткой из трубчатого сверхпроводника.

Основными элементами таких магнитов являются железное ярмо и сверхпроводящая обмотка. Железное ярмо вдвое снижает ампер-витки обмотки, необходимые для создания магнитного поля заданной величины, формирует поле с высокой однородностью и воспринимает действующие на обмотку магнитные силы. Сверхпроводящая обмотка в несколько раз /в зависимости от частоты повторения циклов ускорения/ снижает расход электроэнергии. Благодаря высокой конструктивной плотности тока  $\sim 1,2 \cdot 10^4$  А·см<sup>-2</sup>/ сверхпроводящая обмотка позволяет в  $\sim 5$  раз уменьшить площадь поперечного сечения магнита

по сравнению с "теплым" магнитом, имеющим такую же апертуру. Кроме того, для магнита с железным ярмом и сверхпроводящей обмоткой по сравнению с "теплым" магнитом требуется система электропитания меньшей мощности из-за отсутствия в нем активного электросопротивления и более низкого индуктивного сопротивления. Для магнитов из трубчатого сверхпроводящего кабеля надобность в гелиевом сосуде криостата отпадает. Это обстоятельство существенно упрощает конструкцию криостата и облегчает доступ к магнитной системе ускорителя, уменьшает количество гелия в системе и повышает криогенную безопасность. Кроме того, резко снижаются требования к конструкции вакуумной камеры ускорителя, если надобность в ней не отпадет из-за наличия криогенной откачки. Такие магниты имеют высокую механическую и электрическую прочность.

Для отработки технологии изготовления магнитов из трубчатого сверхпроводника, оценки затрат на их производство, а также получения экспериментальных характеристик был создан полномасштабный  $l = 1,5$  м/ дипольный магнит и проведены его испытания.

## МАГНИТ

Магнит /рис.1/ состоит из двух симметричных частей длиной 1,5 м и имеет апертуру  $90 \times 42$  мм<sup>2</sup>. Размеры железного ярма /4/ -  $1400 \times 256 \times 166$  мм<sup>3</sup>. Полуярма изготовлены из листов трансформаторной стали толщиной 0,5 мм, сваренных с двумя стальными уголками толщиной 8 мм и торцевыми листовыми накладками толщиной 10 мм. Двухслойная седлообразная обмотка /8/ содержит двенадцать витков, она выполнена из трубчатого сверхпроводящего кабеля, который изготовлен путем навивки 31-го сверхпроводящего провода диаметром 0,5 мм на мельхиоровую трубку диаметром  $5 \times 0,5$  мм спирально с шагом 47 мм. Провод содержит 1045 NbTi-волокон диаметром 10 мкм в медной матрице. Витковая изоляция состоит из четырех слоев майларовой ленты толщиной 0,02 мм и двух слоев стеклоленты толщиной 0,08 мм, пропитанной эпоксидным компаундом. В данном экспериментальном варианте магнита предусмотрена возможность демонтажа обмотки. Поэтому после установки полуобмоток в ярмо они фиксируются с помощью болтов /3/. Четыре стальных болта диаметром 8 мм, установленные через каждые 300 мм по длине магнита, подтягивают обмотку к железу.

## КРИОСТАТ

Горизонтальный криостат /см.рис.1/ представляет собой вакуумный кожух /1/ цилиндрической формы с размещенным внутри него медным экраном /10/, охлаждаемым жидким азотом. Магнит установлен в криостате на одной опоре, расположенной по центру. Опора /6/

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

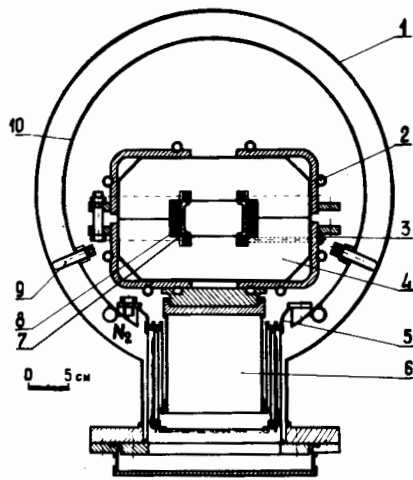


Рис.1. Компоненка магнита в криостате: 1 - вакуумный кожух, 2 - змеевик для охлаждения ярма, 3 - болт, 4 - железное ярмо, 5 - тепловой контакт, 6 - опора магнита, 7 - изолировочная прокладка, 8 - сверхпроводящая обмотка, 9 - опора азотного экрана, 10 - азотный экран.

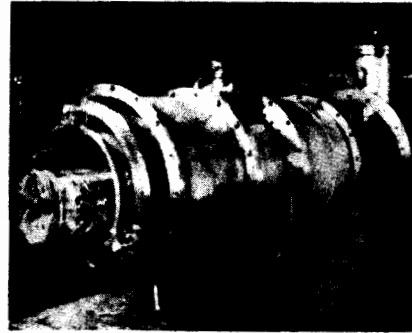


Рис.2. Магнит после установки в криостат.

изготовлена из концентрических, сваренных между собой нержавеющей труб и имеет тепловой контакт /5/ с азотным экраном.

На рис.2 показан магнит после установки в криостат.

#### СХЕМА УСТАНОВКИ И ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Схема криостатирования магнита представлена на рис.3. Для упрощения криогенного обеспечения при испытаниях магнита создан сателлитный рефрижератор, работающий по дроссельной схеме без детандеров. Основные параметры сателлитного рефрижератора:  $\dot{m} \leq 5 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\alpha \approx 0,15$ ; объем жидкого гелия в гелиевом сосуде 300 л; гидравлическое сопротивление обратному потоку при  $\dot{m} = 5 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$   $\Delta p \approx 0,02 \text{ МПа}$ .

Жидкий гелий из переохладителя /10/ сателлитного рефрижератора разделяется на две части и подается в полуобмотки магнита. Проходя каналы полуобмоток, гелий из однофазного состояния переходит в двухфазное. Часть потока с массовым расходом  $\dot{m} \cdot c$  последовательно проходит полуобмотку /6/, регулирующий вентиль /5/, змеевик /4/ для охлаждения железного ярма /3/ и далее поступает на охлаждение токовводов /2/. Другая часть потока с массовым расходом  $\dot{m} \cdot (1-c)$  проходит полуобмотку /7/, регулирующий вентиль /8/ и после теплоотвода от "холодных" концов токовводов /2/

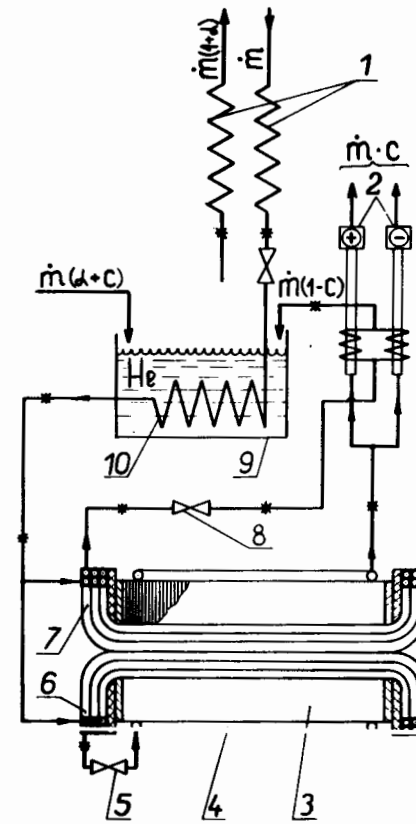


Рис.3. Схема криостатирования магнита: 1 - теплообменник; 2 - токовводы; 3 - железное ярмо; 4 - змеевик для охлаждения ярма; 5,8 - регулирующие вентили; 6,7 - полуобмотки; 9 - гелиевый сосуд сателлитного рефрижератора; 10 - переохладитель.

возвращается в гелиевый сосуд /9/ сателлитного рефрижератора. В гелиевый сосуд из дьюара с жидким гелием поступает поток с массовым расходом  $\dot{m} \cdot (\alpha + c)$ , необходимый для работы сателлитного рефрижератора. Массовый расход  $\dot{m}$  измеряется с помощью шайб с калиброванными отверстиями, установленных на пути потока сжатого гелия от компрессора к теплообменнику /1/ рефрижератора. Массовые расходы  $\dot{m} \cdot c$  и  $\dot{m} \cdot (1 + \alpha)$  измеряются с помощью газовых счетчиков. Температура измеряется с помощью угольных термометров сопротивления ТВ0/8/, установленных в потоке гелия.

Криостатирование полуобмоток осуществлялось потоком двухфазного гелия со следующими параметрами: массовое паросодержание -  $0 \div 1$ ; удельный массовый расход -  $12 \div 260 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ; максимальная температура -  $4,5 \div 5 \text{ К}$ . Критический ток в магните при температуре  $4,5 \text{ К} - 6 \text{ кА}$ . При этом магнитное поле в центре апертуры диполя составляло 2 Т.

Гармонический анализ магнитного поля проводился с помощью плоских индукционных катушек, вращающихся в апертуре магнита. Интегральная относительная неоднородность магнитного поля в апертуре на уровне 2 Т составила  $\frac{\Delta B}{B_0} = 4 \cdot 10^{-4}$  на радиусе 20 мм.

Тепловыделения в магните определялись по уравнению энергетического баланса. Для этого потоки по полуобмоткам регулировались таким образом, чтобы в местах определения энтальпии гелий был в однофазном состоянии /жидком или газообразном/. Статический теплоприток к магниту, включая теплоприток по опоре, составил 3,3 Вт. Теплоприток к каждому из регулирующих вентилях - 0,8 Вт.

Магнит возбуждался непрерывными импульсами тока, имевшими форму равнобедренных треугольников. Динамические тепловыделения



в магните при скорости изменения поля  $\dot{B} = 5 \text{ Т с}^{-1}$  составили  $\sim 30 \text{ Вт}$ . Около половины динамических тепловыделений приходилось на железо. При этом для ускорителя, работающего со скоростью изменения поля  $4 \text{ Т с}^{-1}$  и частотой повторения циклов ускорения  $0,2 \text{ Гц}$ , суммарный теплоприток к гелию составит  $\sim 5 \text{ Вт}$  на  $1 \text{ м}$  длины магнитной дорожки. Намечены пути снижения динамических тепловыделений, в первую очередь за счет снижения тепловыделений в железном ярме. Это позволит при том же суммарном теплопритоке к гелию повысить частоту повторения циклов ускорения.

Потери давления в полуобмотке магнита, измеренные при удельном массовом расходе  $38 \text{ кг м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , среднем давлении в канале  $0,16 \text{ МПа}$  и изменении паросодержания гелиевой смеси при импульсном режиме работы от 0 на входе до 1 на выходе, составили  $6 \text{ кПа}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.П. и др. ОИЯИ, 9-7148, Дубна, 1973.
2. Балдин А.М. и др. В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т.2, с.4.
3. Baldin A.M. Proc. of the 1981 CERN-JINR School of Physics. Geneva, 1982, p.1.
4. Балдин А.М. и др. В кн.: Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1977, т.2, с.63.
5. Аверичев С.А. и др. ОИЯИ, P8-11700, Дубна, 1978.
6. Агапов Н.Н. и др. ПТЭ, 1981, № 2, с.196;  
Agarov N.N. et al. Cryogenics, 1980, vol.20, No.6, p.345.
7. Дьячков Е.И. и др. ОИЯИ, 8-82-169, Дубна, 1982.
8. Дацков В.И. ПТЭ, 1981, № 4, с.253.

Смирнов А.А. и др.  
Импульсный сверхпроводящий дипольный магнит для нуклотрона

9-83-625

Описывается полномасштабный сверхпроводящий магнит для синхротрона релятивистских ядер в ОИЯИ. Поле в магните формируется железом. Обмотка выполнена из трубчатого сверхпроводящего кабеля. Кабель состоит из трубки, на которую спирально навиты провода из мелкодисперсного Nb-Ti сверхпроводника. Основные характеристики магнита: длина -  $1,5 \text{ м}$ , апертура -  $90 \times 42 \text{ мм}^2$ , магнитное поле -  $2 \text{ Т}$ , критический ток при  $4,5 \text{ К}$  -  $6 \text{ кА}$ , интегральная относительная неоднородность магнитного поля  $\Delta B/B$  на уровне  $2 \text{ Т}$  и радиусе  $20 \text{ мм}$  -  $4 \cdot 10^{-4}$ . Магнит криостатируется потоком двухфазного гелия от специального спутникового рефрижератора.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Smirnov A.A. et al.  
Pulsed Superconducting Dipole Magnet for Nuclotron

9-83-625

A fullscale superconducting cold-iron magnet of the JINR for relativistic nucleus synchrotron is described. A magnet bore field is formed by iron yoke. A hollow composite superconductor of winding consists of a pipe at which multifilament Nb-Ti superconductors are cabled. The main characteristics of the magnet are the following: - length -  $1.5 \text{ m}$ , aperture -  $90 \times 42 \text{ mm}^2$ , magnet field -  $2 \text{ T}$ , critical current at  $4.5 \text{ K}$  -  $6 \text{ kA}$ , integral magnetic field inhomogeneity  $\Delta B/B$  at the  $2 \text{ T}$  level -  $4 \cdot 10^{-4}$  at the radius of  $20 \text{ mm}$ . The magnet is cooled by two-phase helium flow from the special design satellite refrigerator.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой