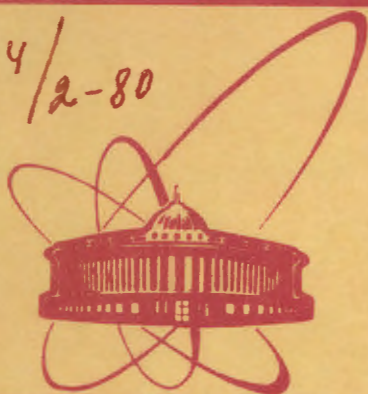


484/2-80



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

4/2-80

P8 - 12786

Н.Н.Агапов, Е.И.Дьячков, А.Г.Зельдович,
В.В.Крылов, В.Н.Кузичев, Ю.В.Куликов,
Е.К.Курятников, Л.Г.Макаров, П.И.Никитаев,
Н.М.Сазонов, А.А.Смирнов, В.В.Стекольщиков,
Г.Г.Ходжибагиян

ИМПУЛЬСНЫЙ ДИПОЛЬНЫЙ МАГНИТ
ИЗ ТРУБЧАТОГО СВЕРХПРОВОДНИКА
С ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ
КРИОСТАТИРОВАНИЯ

1979

Агапов Н.Н. и др.

P8 - 12786

Импульсный дипольный магнит из трубчатого сверхпроводника с циркуляционной системой криостатирования

Если поле сверхпроводящего дипольного магнита ограничить величиной около 2,5 Т и выполнить магнит по типу "оконная рама", то можно существенно упростить его конструкцию, уменьшить объем сверхпроводящей обмотки. При этом, если обмотку магнита сделать из сверхпроводящего кабеля с каналом для криоагента, то существенно упрощается конструкция криостата ускорителя и облегчается доступ к магнитной системе. Для оценки перспектив применения магнитов типа "оконная рама" с циркуляционной системой криостатирования при сооружении нуклотрона - сверхпроводящего ускорителя релятивистских ядер в ЛВЭ ОИЯИ был изготовлен и испытан дипольный магнит длиной около 0,4 м, апертурой 5,5 см, с полем до 2,5 Т. Кабель магнита выполнен из мельхиоровой трубки $\varnothing 5 \times 0,5$ мм, на которую спирально навиты и припаяны проволоки из мелкодисперсного сверхпроводника. Описана конструкция магнита с циркуляционной системой криостатирования потоком двухфазного гелия. Приводятся зависимости деградации критического тока и тепловыделений в магните от скорости изменения магнитного поля, величины его неоднородности и гидравлического сопротивления.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Agapov N.N. et al.

P8 - 12786

Pulsed Dipole Magnet of Hollow Composite Superconductor with a Circulation Refrigeration System

When a superconducting dipole magnetic field is limited by a value of about 2.5 T using a "window frame" type dipole, the design of such a magnet can be essentially simplified, and the superconducting winding volume can be decreased as well. If the winding is made of hollow composite superconductor, the cryostat construction is simplified and it is easy to handle with superconducting magnets. In order to estimate the prospects of using "window frame" type dipole magnets with a circulation refrigeration system for the project of the NUCLOTRON accelerator, the dipole magnet with a length of about 0.4 m, a 5.5 cm aperture and a magnetic field of up to 2.5 T has been constructed and tested at the High Energy Laboratory, JINR. The superconducting cable of the magnet consists of a cupro-nickel pipe with an outer diameter of 5 mm and a wall thickness of 0.5 mm on which multifilament superconductors are cabled. The magnet construction with a two-phase helium circulating refrigeration system is described. The dependences are presented of the critical current degradation and of AC losses on the magnetic field inhomogeneity and hydraulic resistance.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа выполнена в соответствии с развиваемой в ЛВЭ ОИЯИ программой сооружения нуклотрона - сверхпроводящего синхротрона релятивистских ядер^{/1/}. Если поле сверхпроводящего дипольного магнита ограничить величиной около 2,5 Т и выполнить магнит по типу "оконная рама", то существенно упрощается его конструкция и уменьшается объем сверхпроводящей обмотки^{/2/}. При этом, если обмотку магнита сделать из сверхпроводящего кабеля с каналом для циркуляции криоагента, то существенно упростится криостатная система, облегчится доступ к магнитам синхротрона и резко снизятся требования к конструкции вакуумной камеры ускорителя. К другим важным достоинствам циркуляционного способа охлаждения относятся возможность создания магнитов с более высокой механической и электрической прочностью, меньшее количество гелия в системе, большая криогенная безопасность и др.^{/3,4/}.

Большое значение имеет вопрос о том, что предпочтительнее использовать в качестве криоагента: жидкий гелий или двухфазный парожидкостный поток?

В разрабатываемых сверхпроводящих ускорителях^{/5,6/} в качестве криоагента выбран жидкий гелий. Вероятно, считалось, что при использовании двухфазного гелия в сверхпроводящих циркуляционных системах возможно блокирование охлаждающих каналов "паровыми пробками", неравномерность распределения потоков в неизбежных в этом случае параллельных каналах, значительные колебания давления и расхода гелия. Однако, как указывалось в^{/7,8/}, эти опасения могут оказаться преувеличенными и в большинстве случаев предпочтительнее использовать двухфазный гелий.

Сверхпроводящие магниты с циркуляционной системой криостатирования потоком жидкого и двухфазного гелия, предназначенные для работы на постоянном токе, описаны в^{/9,10,11/}.

Для экспериментальной проверки работоспособности импульсных магнитов с циркуляционной системой криостатирования был создан модельный магнит из трубчатого сверхпроводника и проведены его первые испытания на двухфазном гелии.

КОНСТРУКЦИЯ МАГНИТА

Основным силовым элементом конструкции диполя служит железное ярмо, которое воспринимает динамические усилия, возникающие при импульсном возбуждении обмотки магнита. Ярмо состоит из двух симметричных частей, изготовленных из 0,5-миллиметровых листов трансформаторной стали и скрепленных двумя стальными уголками толщиной 4 мм, сваренными с листовой сталью и торцовыми листовыми накладками толщиной 8 мм. Магнит показан на рис. 1; основные его параметры указаны в таблице.

Обмотка выполнена из трубчатого кабеля, изготовленного путем навивки сверхпроводящего провода на мельхиоровую трубку. Тридцать один провод спирально с шагом 47 мм наматывался на облуженную мельхиоровую трубку диаметром 5х0,5 мм. Затем трубчатый кабель пропущался через ванну с расплавленным припоем, содержащим 95% олова и 5% серебра.

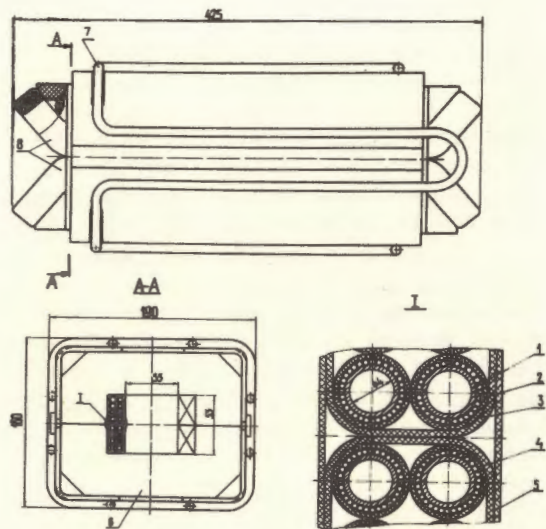


Рис. 1. Магнит. 1 - трубка кабеля, 2 - сверхпроводящий провод, 3 - бандаж из стеклоленты, 4 - витковая изоляция, 5 - проставка из текстолита, 6 - полуярмо, 7 - змеевик для охлаждения ярма, 8 - полуобмотки.

Таблица

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

Две седлообразные полуобмотки магнита были изготовлены с помощью приспособления, показанного на рис. 2. Их лобовые части изгибались путем обкатки кабеля роликом вокруг цилиндрических поверхностей приспособления. Лобовые части обмотки были отогнуты на угол 55°, минимальный радиус изгиба кабеля составлял 17,5 мм.

Витковая изоляция состоит из четырех слоев майларовой ленты толщиной 0,02 мм и шириной 8 мм и двух слоев стеклоленты толщиной 0,08 мм и шириной 10 мм, пропитанной эпоксидным компаундом.

После нанесения витковой изоляции полуобмотки снова устанавливались в указанное приспособление и обжимались

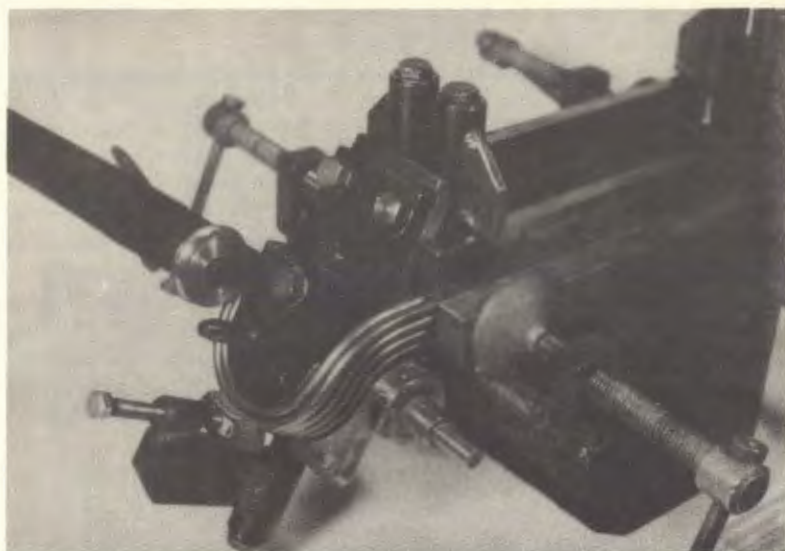


Рис. 2. Приспособление для изготовления обмотки.

струбцинами. Затем проводилось их бандажирование с помощью нескольких слоев стеклотенты /10 слоев для лобовых частей полуобмоток и 4 слоя для прямолинейных участков/. Полуобмотки устанавливались в полуярма и с помощью специальных устройств прижимались к полуярмам до получения заданных размеров по горизонтали и вертикали. Далее магнит собирался полностью и помещался в печь для полимеризации смолы.

СХЕМА УСТАНОВКИ

Схема криостатирования магнита представлена на рис. 3. Сжатый гелий поступает из концевого теплообменника 1 рефрижератора /12/, дросселируется в вентиле 2 и подается в гелиевую магистраль 4 при сверхкритическом давлении после охлаждения в змеевике 3 до температуры кипящего гелия. Из гелиевой магистрали одна часть потока направляется в криостат 5, а другая - возвращается в сборник рефрижератора 6. Поступивший в криостат поток, пройдя через фильтр 7, разделяется на две части; одна из которых через вентиль 8 направляется на охлаждение токовводов 9, а другая - подается

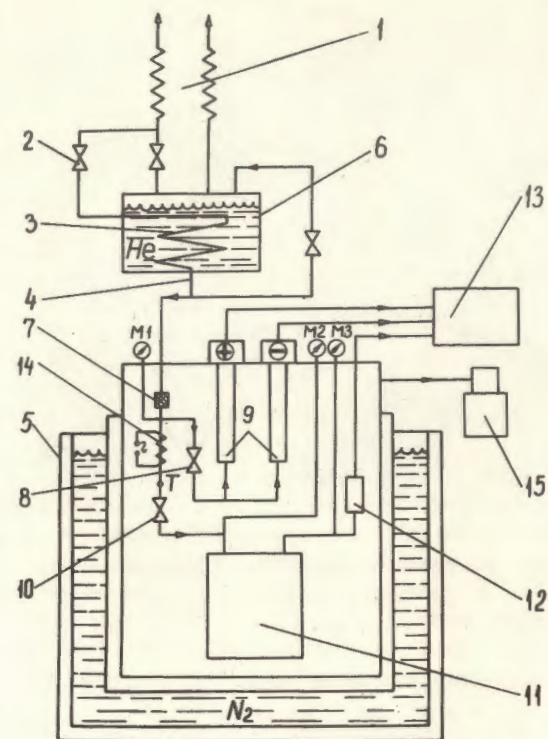


Рис. 3. Схема циркуляционной системы криостатирования магнита. 1 - теплообменник; 2, 8, 20 - вентили; 3 - змеевик; 4 - гелиевая магистраль с многослойной экрановакуумной изоляцией; 5 - криостат; 6 - сборник жидкого гелия; 7 - фильтр; 9 - токовводы; 11 - магнит; 12 - прибор для измерения массового расхода и паросодержания потока; 13 - система индикации и измерения объемных расходов гелия; 14 - электронагреватель; 15 - диффузионный вакуумный насос; M1, M2, M3 - манометры.

в магнит 11 после дросселирования в вентиле 10 до давления ниже критического. Образовавшийся при дросселировании в вентиле 10 охлаждающий магнит двухфазный поток последовательно проходит по каналу сверхпроводящего трубчатого кабеля обмотки и по змеевику, припаянному к железному яру. На выходе двухфазного потока из магнита установлен прибор 12, с помощью которого измеряется массовый расход и паросодер-

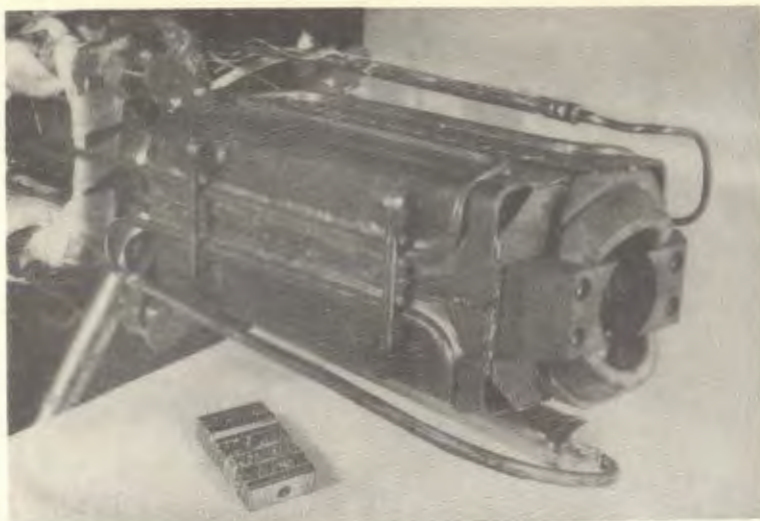


Рис. 4. Магнит перед установкой в криостат.

жание потока. Газообразный гелий выводится из криостата через систему индикации и измерения объемных расходов 13.

Параметры однофазного гелия перед вентилем 10 определяются посредством манометра М1 и термометра Т. Электронагреватель 14 служит для изменения паросодержания потока на входе в магнит. С помощью манометров М2 и М3 измеряются давления потока на входе в магнит и выходе из него. Внутренний сосуд криостата 5 имеет диаметр 300 мм, высоту 1600 мм и может откачиваться диффузионным вакуумным насосом 15.

На рис. 4 показан магнит перед установкой в криостат.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Магнит испытывался в вертикальном положении. Криостатирование магнита осуществлялось потоком двухфазного гелия со следующими параметрами: массовое паросодержание - $0,43 \pm 1$; удельный массовый расход - 50 ± 200 кг/м²·с; максимальная температура - $4,4 \pm 4,7$ К.

Достигнутые значения критического тока и магнитного поля приведены в таблице.

Тренировка магнита не наблюдалась.

В процессе испытаний осуществлено несколько десятков переходов магнита из сверхпроводящего состояния в нормальное и восемь охладений магнита от температуры окружающей среды до температуры жидкого гелия. При этом никаких изменений характеристик магнита не наблюдалось.

Величина магнитного поля в центре диполя измерялась датчиком Холла. Распределение магнитного поля в центральном сечении апертуры магнита снималось на уровне $1,75 \cdot 10^{-2}$ Т при температуре окружающей среды с помощью датчиков Холла. Результаты измерений приведены на рис. 5.

Однородность магнитного поля в рабочей апертуре магнита можно существенно повысить путем более точного согласования высоты обмотки с величиной зазора железного яра, например уменьшив толщину горизонтальных текстолитовых проставок между обмоткой и ярмом.

Магнит в экспериментах возбуждался импульсами тока треугольной формы без пауз между ними.

Тепловыделение в магните определялось исходя из энергетического баланса.

На рис. 6 приведены результаты измерений тепловыделения в магните в зависимости от скорости изменения поля в центре магнита \dot{B} . Измерения проводились в циклах с максимальными значениями поля B_M от 0,7 Т до 2,25 Т. Как видно из рис. 6, тепловыделение в магните не зависит от амплитуды поля в указанном интервале значений B_M и при заданной величине \dot{B} .

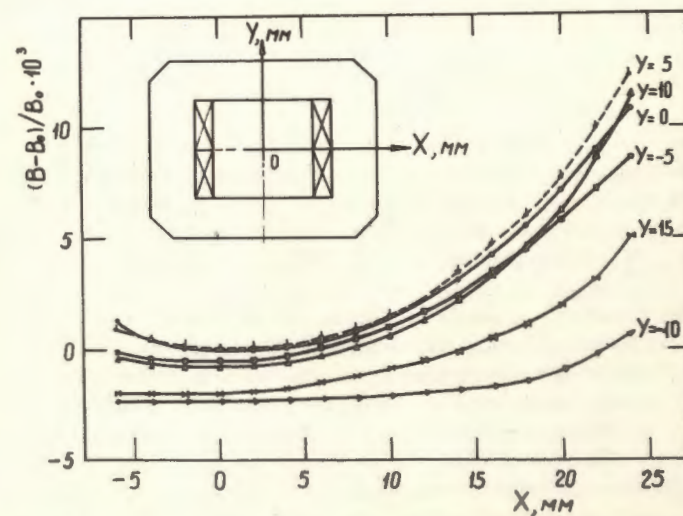


Рис. 5. Распределение поля в центре магнита на уровне $1,75 \cdot 10^{-2}$ Т.

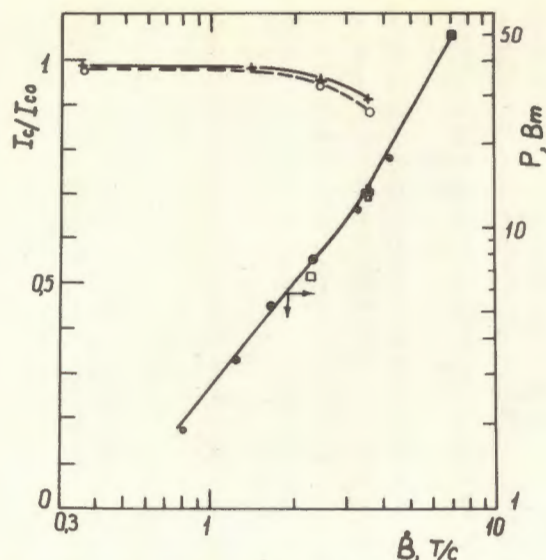


Рис. 6. Зависимость тепловыделений P и степени деградации критического тока I_c/I_{c0} от величины \dot{B} в центре магнита.
 • - импульсы поля треугольной формы с амплитудой $B_M = 2$ Т /без пауз между импульсами/; ■ - $B_M = 1,4$ Т; Δ - $B_M = 1,4$ Т; \square - $B_M = 0,7$ Т; + - получены при удельном массовом расходе $G = 120$ кг/м²·с и максимальной температуре гелия в магните $T_M = 4,6$ К; \circ - $G = 160$ кг/м²·с, $T_M = 4,7$ К. $I_{c0} = 7380$ А получен при $\dot{B} \leq 1$ Т/с и $T_M = 4,4$ К.

Для уменьшения тепловыделения при больших скоростях изменения поля необходимо увеличить электрическое сопротивление между проволоками в кабеле.

На рис. 6 также показана зависимость степени деградации критического тока I_c/I_{c0} от скорости изменения поля при циклической работе для двух значений удельных массовых расходов и максимальных температур гелия в магните.

Низкие значения деградации критического тока при больших скоростях изменения поля и соответствующем тепловыделении в магните указывают на хорошие условия охлаждения сверхпроводника, обусловленные малым термическим сопротивлением между сверхпроводником и охлаждающим гелием. Это подтверждается тем, что не наблюдалось зависимости деградации от удельного массового расхода и паросодержания гелия даже

в том случае, когда пар, выходящий из магнита, имел температуру, равную температуре двухфазной смеси на входе в магнит.

Потери давления в магните, измеренные при удельных массовых расходах смеси 54 ± 127 кг/м²·с и усредненных по длине охлаждающего канала величинах паросодержания $0,52 \pm 0,73$, составили $0,12 \cdot 10^5 \pm 0,37 \cdot 10^5$ Н/м².

Колебания давления на входе в магнит не превышали величины $0,02 \cdot 10^5$ Н/м² при возбуждении обмотки треугольными импульсами тока /с длительностью каждого импульса 6 секунд и менее/, следующими друг за другом без пауз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан сверхпроводящий импульсный дипольный магнит для получения полей до 2,4 Т с циркуляционной системой криостатирования. Магнит отличается простотой в изготовлении и низкой стоимостью.

Он устойчиво работал при криостатировании потоком двухфазного гелия с массовым паросодержанием $0,43 \pm 1$ и с удельным массовым расходом 50 ± 200 кг/м²·с. Благодаря хорошим условиям криостатирования, в магните наблюдалась низкая деградация критического тока. Даже при скорости изменения поля 3,5 Т/с деградация не превышала 10%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балдин А.М. и др. Нуклотрон - ускорительный комплекс релятивистских ядер в ЛВЭ ОИЯИ. В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т.2, с.4-8.
2. Аверичев С.А. и др. ОИЯИ, P8-11700, Дубна, 1978.
3. Keilin V.E. et al. Cryogenics, 1968, v.8, No.6, p.397-398.
4. Morpurgo M. CERN 68-17, Geneva, 1968.
5. The Energy Doubler. A Progress Report for the Energy Doubler Saver, Collidev Project. Batavia Fermi National Accelerator Laboratory, 1976.
6. Brown D.P. Brookhaven National Lab., Upton, 1976, No.50514.
7. Keilin V.E. et al. Cryogenics, 1970, v.10, No.3, p.224-232.
8. Иванов Д.П., Лелехов С.А. Препринт ИАЭ им. И.В.Курчатова. ИАЭ-3043, М., 1978.
9. Morpurgo M. Part. Accel., 1970, v.1, p.255-263.

10. Vecsey G. et al. The superconducting Muon Channels. In: Proceedings of the V International Conference on Magnet Technology, 1975, p.110-119.
11. Morpurgo M.A. CERN-EP/79-05, Geneva, 1979.
12. Агапов Н.Н., Белушкин В.А., Зельдович А.Г.
В сб.: Химическое и нефтяное машиностроение.
ЦИНТИхимнефтемаш, М., 1976, №2, с.32-33.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 сентября 1979 года.