

**объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна**

**P9-82-383**

**И.А.Шелаев, С.А.Аверичев, В.Г.Аксенов,  
В.С.Алфеев, А.М.Балдин, З.В.Борисовская,  
И.Е.Карпунина, Ю.В.Куликов, Б.К.Курятников,  
В.И.Лобанов, Л.Г.Макаров, Е.А.Матюшевский,  
П.И.Никитаев, А.А.Смирнов, И.П.Юдин**

**ТРИ ПРОТОТИПНЫХ ПЕРИОДА СП  
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ**

Направлено в Оргкомитет IX Международной  
конференции по криогенной технике  
/Кобэ, Япония, май 1982 г./

**1982**

## ВВЕДЕНИЕ

Разрабатываемые в Лаборатории высоких энергий сверхпроводящие магнитные системы предназначены для получения опыта создания СП ускорителя /1/, необходимого для подготовки технического проекта нуклотрона /2/. Сооружение трех прототипных периодов позволяет изучить экспериментально поведение СП магнитной системы, содержащей значительное число отдельных магнитов.

Каждый период длиной 1,5 м содержит два импульсных поворотных СП магнита, две квадрупольные линзы, сверхвысоковакуумную камеру и горизонтальный гелиевый криостат, оборудованный системой механической юстировки положения магнитных элементов.

## ОБОРУДОВАНИЕ ТРЕХ ПЕРИОДОВ

Магнит. В поворотном СП магните типа оконной рамы, поперечное сечение которого представлено на рис. 1а, магнитное поле формируется СП обмоткой и близко расположенным железным сердечником. Сердечник вдвое снижает ампервитки обмотки, необходимые для создания магнитного поля заданной величины, формирует поле с высокой однородностью и воспринимает действующие на обмотку магнитные силы.

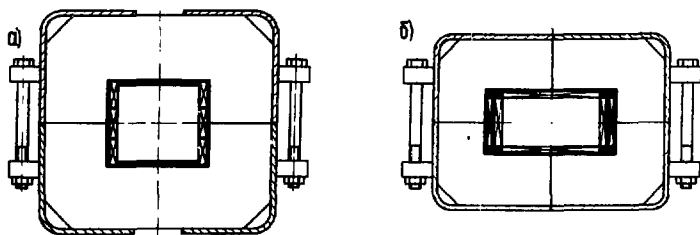


Рис. 1

Для трех прототипных периодов были изготовлены 6 магнитов типа оконной рамы. Сердечник магнита изготовлен из листовой трансформаторной стали толщиной 0,5 мм, содержащей 3,5% крем-

ния, и имеет внешние размеры  $15 \times 14$  см<sup>2</sup> с окном размером  $65 \times 55$  мм<sup>2</sup>. Физическая длина магнита 42 см, длина по полю - 43 см. Однослойная обмотка содержит 48 витков кабеля с поперечным сечением  $0,92 \times 3,75$  мм<sup>2</sup>, состоящего из 15 транспонированных проводов диаметром 0,5 мм. Провод содержит 1045 ниобий-титановых нитей диаметром 10 мкм, отношение меди к сверхпроводнику 1,5:1. Для изоляции кабеля использовались два слоя лавсановой пленки толщиной 20 мкм и стеклотента толщиной 0,1 мм, предварительно пропитанная эпоксидной смолой горячего отверждения. Между сердечником и обмоткой приклеены изоляционные стеклотекстолитовые пластины толщиной 0,5 мм на полюсах и 1 мм на боковых стенках, имеющие каналы шириной 4 мм для жидкого гелия. На торцах магнита толщина пластин увеличена до 8 мм для обеспечения ввода обмотки. В процессе изготовления магнита на предварительно изолированный сердечник укладывается СП обмотка, ее размеры фиксируются специальными прижимами, а затем в нагревательной печи при температуре 1450°C обмотка приклеивается к сердечнику за счет полимеризации смолы, содержащейся в изоляции кабеля. Магнит имеет индуктивность 1,5 мГн и рассчитан на поле 2,3 Т при токе 2,1 кА.

Изоляционная прокладка между полюсом магнита и обмоткой создает нелинейные искажения формы поля, в частности, порождает секступольную гармонику амплитудой 0,7% от основной. Для компенсации секступольной и декапольной гармоник одновременно в обмотке установлены две пары дополнительных изоляционных прокладок толщиной 0,8 мм между витками 7 и 8, считая от плоскости симметрии магнита<sup>/3/</sup>. Благодаря этому интегральная амплитуда указанных гармоник оказывается не более 0,1-0,2% на радиусе  $2,5$  см<sup>/4/</sup>. Для контроля за величиной секступольной гармоники на больших уровнях поля, где проявляется насыщение железа сердечника, на полюсах магнита укреплены плоские корректирующие обмотки, в каждой из которых имеется 15 витков СП провода диаметром 0,5 мм.

Линза. Шихтованный сердечник квадрупольной линзы типа Пановского /рис.16/ имеет поперечные размеры  $15 \times 11$  см<sup>2</sup> и длину 15 см. В окне сердечника с размерами  $84 \times 42$  мм<sup>2</sup> размещается  $28 \times 4$  витка обмотки, выполненной 13-проводным СП кабелем того же типа, что и в магните. Апертура линзы  $32 \times 64$  мм<sup>2</sup>. Линза имеет индуктивность 0,67 мГн и рассчитана на градиент 88 Т/м при токе 1,63 кА. При этом максимальная напряженность магнитного поля на сверхпроводящей обмотке равна 3,5 Т, а на полюсах не превосходит 2,5 Т, поэтому связанная с насыщением полюсов нелинейность градиента практически незаметна. В Ф-линзах большая сторона апертуры ориентирована горизонтально, а в Д - вертикально, что позволяет эффективно использовать апертуру линз при фокусировке пучка.

Камера. Сверхвысоковакуумная камера прототипных периодов изготовлена из нержавеющей стали со стенками толщиной 0,5 мм/5/. В поворотных магнитах камера круглая, с внутренним диаметром 50 мм, в линзах - эллиптическая, с осями 30x62 мм<sup>2</sup>. Между магнитами и линзами камера имеет свободные промежутки длиной 9 см для размещения пикап-электродов, корректирующих безжелезных магнитов и пр. Отдельные участки камеры одного периода соединяются между собой сваркой, а камеры соседних периодов - с помощью разборного соединения типа конфлэт. Камера одного периода имеет длину 1,5 м и в центре снабжена вертикальным патрубком, выходящим вниз через стенку гелиевой ванны в изоляционную полость криостата. Здесь к патрубку в среднем периоде подсоединен магниторазрядный насос типа Норд-100, а в крайних - датчики давления. На выходе из гелиевой ванны патрубок имеет проходной изолятор, обеспечивающий электрическую изоляцию камеры от гелиевой ванны.

Криостат. Гелиевая ванна представляет собой цилиндр из нержавеющей стали диаметром 28 см со стенкой толщиной 1,5 мм. Для удобства монтажа и ремонта размещенного внутри ванны оборудования цилиндр разрезан на две половины по горизонтальной плоскости. Гелиевая ванна уплотняется сварными швами многократного пользования и на конце каждого периода снабжена сифоном диаметром 28 мм, допускающим независимую регулировку соседних ванн. Для теплоизоляции ванна окружена разборным азотным экраном и теплым вакуумным кожухом. Все магнитные элементы одного периода с общим весом 120 кг с помещенной в них вакуумной камерой установлены на общем ложементе, обеспечивающем взаимное положение магнитных элементов с точностью не хуже 0,05 мм. Ложемент и гелиевая ванна в центре периода поддерживаются тепловым мостом в виде цилиндрического лабиринта из трех коаксиальных цилиндров. Внешний цилиндр поддерживает азотный экран и внизу оборудован юстировочным устройством, позволяющим на тепле контролировать пространственное положение ложемента периода. Через внутренний цилиндр лабиринта проходит вертикальный патрубок вакуумной камеры.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Внешний вид трех прототипных периодов в момент сборки показан на рис.2. Все магниты и линзы перед установкой в рабочий криостат испытывались в отдельном горизонтальном криостате. На рис.3а,б показаны кривые тренировки СП магнитов и линз, где 100% соответствуют расчетному рабочему току. При тренировке



Рис.2

ток в магнитах и линзах рос со скоростью порядка 100 А/с вплоть до перехода обмотки в нормальное состояние. Если магниты практически не имеют тренировки /рис.3а/, то критический ток линз приближается к 100% после 5-6 переходов в нормальное состояние. По-видимому, это связано с тем, что часть обмотки линзы имеет два слоя. На рис.4а,б показаны зависимости критического тока магнитов и линз от частоты следования импульсов тока в форме равнобедренных треугольников. Видно, что даже при частоте следования импульсов 1 Гц критический ток магнитов снижается всего на 20%. Потери энергии в магните, возбуждаемом импульсным током, составляют около 2 Вт при частоте 0,2 Гц. В криостатах прототипных периодов все магниты соединялись последова-

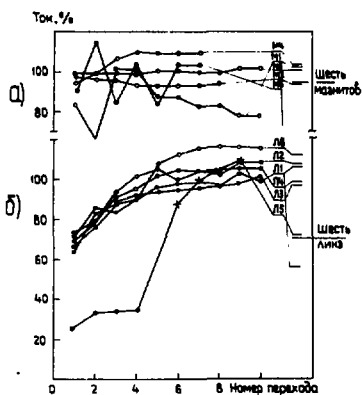


Рис. 3

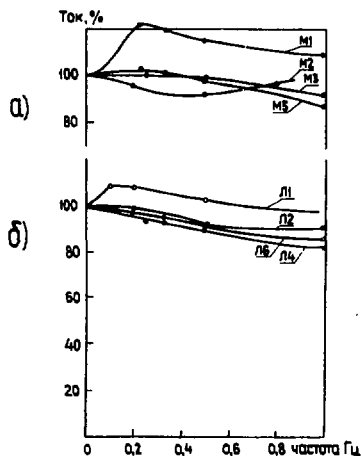


Рис. 4

тельно и питались от отдельного источника тока через свою пару токовводов. Токовводы выполнены в виде медных коаксиальных цилиндров, на внешней поверхности которых нарезаны винтовые каналы для прохода охлаждающего газообразного гелия. Через такую же пару токовводов от другого источника тока питались квадрупольные линзы. Критический ток всех 6 магнитов был равен 1,97 кА или 95% номинального, а линз - 1,15 кА или 70%. Измерения показали, что критический ток определялся линзой №5, обмотка которой ремонтировалась после случайного повреждения в процессе монтажа.

Вакуумные камеры трех периодов перед установкой в криостаты обезгаживались в отдельном стенде прогревом в течение 48 часов при температуре 450°C. После монтажа камеры прогревались на месте в течение 3 часов при температуре 140°C. Эта процедура позволила получить давление в камерах порядка 3 мПа при комнатной температуре и 10 нПа - при температуре жидкого гелия.

В первых двух охлаждениях криостата трех прототипных периодов статический теплоприток к гелиевой ванне общей длиной 5,4 м, включая также токовводы, составил 53 Вт. Столь большая величина теплопритока была вызвана случайными тепловыми контактами между азотным экраном и гелиевой ванной. В дальнейшем азотный экран был демонтирован и заменен 50-слойной суперизоляцией из алюминизированного лавсана толщиной 11 мкм. Для снижения теплопритока через тепловые мосты, лишённые в этом слу-

чае азотного охлаждения, внутренний цилиндр из нержавеющей стали был заменен цилиндром из стеклотекстолита. В этом варианте теплоизоляции гелиевой ванны измеренный при третьем охлаждении теплоприток оказался равным 32 Вт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование сверхпроводимости в магнитах описанного выше типа позволяет добиться значительной миниатюризации магнитной системы синхротрона при сохранении достаточно большой апертуры вакуумной камеры. Малая материалоемкость магнитов /вес сверхпроводника в них равен 2,5 кг/м/ помимо снижения их стоимости существенно уменьшает также проявление в СП магнитов таких отрицательных эффектов, как потери энергии при импульсном режиме работы, начальное искажение формы магнитного поля за счет вихревых токов в сверхпроводнике и пр. Полученные в ходе описанных экспериментов данные позволяют проектировать синхротрон с достаточно большим отношением максимального поля к минимальному и с длительностью цикла ускорения вплоть до 2-4 с.

Исключение из конструкции магнита силового банджа, роль которого выполняет железный сердечник, существенно упрощает технологию изготовления магнита. Возможность с высокой точностью изготовить сердечник простой формы и последующая намотка на нем СП обмотки обеспечивают высокую точность изготовления магнита и повторяемость параметров магнитного поля в серии магнитов. Все это подтверждает перспективность использования магнитов такого типа в синхротронах, по крайней мере, относительно небольшого периметра.

Получение в холодной вакуумной камере сверхнизкого давления позволит ускорить не только протоны или ядра тяжелых элементов, но и малозарядные тяжелые ионы практически без потерь за счет перезарядки на остаточном газе.

Авторы выражают глубокую благодарность проф. А.Г.Зельдовичу и сотрудникам его отдела за помощь при проведении криогенных испытаний как отдельных магнитов, так и трех прототипных периодов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шелаев И.А., Юдин И.П. ОИЯИ, 9-12346, Дубна, 1979.
2. Балдин А.М. и др. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т.2, с.4-8.
3. Шелаев И.А., Юдин И.П. ОИЯИ, Р9-80-333, Дубна, 1980.

4. Алфеев В.С. и др. Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1981, т.1, с.360-363.
5. Алфеев В.С. и др. ОИЯИ, Р9-81-339, Дубна, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 мая 1982 года.



## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги,  
если они не были заказаны ранее.

Д13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
Д17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
Д6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
Д3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
Д1,2-12036	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12450	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителю заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д4-80-271	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-385	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного семинара по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Шелаев И.А. и др.

P9-82-383

Три прототипных периода СП магнитной системы

С целью экспериментального исследования характеристик СП магнитов и освоения технологии их изготовления были спроектированы, изготовлены и испытаны три прототипных СП магнитных периода. Каждый период содержит два дипольных магнита типа оконной рамы и две квадрупольные линзы Пановского.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Shelaev I.A. et al.

P9-82-383

Three Prototype Cells of a SC Magnet System

To study experimentally the properties of SC magnets and to master the technology of their fabrication, three prototype cells were designed, constructed and tested. Each cell comprises two dipole magnets of the window-frame type and two quadrupole lenses of the Panofsky type.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.

Редактор Б.Б.Колесова. Макет Н.А.Киселевой.  
Набор В.С.Румянцевой.

Подписано в печать 04.06.82.

Формат 60x90/16. Офсетная печать. Уч.-изд.листов 0,74.

Тираж 360. Заказ 31401.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.  
Дубна Московской области.