

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



10122

P1 - 10122

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

Е. И. Дьячков, А. Г. Зельдович, Х. Менке, Ю. А. Шишов

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ
В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

(Обзор)

1976

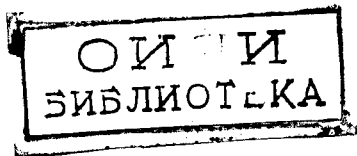
P1 - 10122

Е.И.Дьячков, А.Г.Зельдович, Х.Менке, Ю.А.Шишов

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ
В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

(Обзор)

Направлено в журнал "Электри" /ГДР/



Дьячков Е.И. и др.

P1 - 10122

Сверхпроводящие магниты в физике высоких энергий (обзор)

Приведен обзор работ, содержащих описания некоторых сверхпроводящих магнитных систем, применяемых для обеспечения экспериментов в области физики высоких энергий. В обзоре содержатся разделы: а) импульсные сверхпроводящие магниты и сверхпроводящие ускорители, б) сверхпроводящие магниты постоянного тока в ускорителях и каналах для транспортировки ускоренных частиц, в) магниты для детекторов заряженных частиц.

Кроме того, описаны сверхпроводящие соленоиды, созданные в ОИЯИ для модели криогенной высокочастотной ускорительной секции кольцепетрона.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований

Дубна 1976

Diachkov E.I. et al.

P1 - 10122

Superconducting Magnets in High Energy Physics (Review)

A review is made of the papers describing some superconducting magnet systems used in the high energy physics experiments. The review consists of three sections: a) the pulsed superconducting magnets and superconducting accelerators, b) the superconducting magnets of direct current in accelerators and the channels for accelerated particle transportation, c) magnets for charged particle detectors.

The created at JINR superconducting solenoids used in the model of a cryogenic high frequency accelerating section of a koltsetron are also described.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research

Dubna 1976

© 1976 Объединенный институт ядерных исследований Дубна

ВВЕДЕНИЕ

Физике высоких энергий, значительную долю экспериментального оборудования которой составляют магнитные системы, принадлежит одно из ведущих мест в области технического использования явления сверхпроводимости. По сравнению с обычными сверхпроводящими магнитами менее металлоемки, более компактны, потребляют значительно меньшее количество электроэнергии. В настоящее время разработано и используется много уникальных сверхпроводящих магнитов, намечается серийное изготовление некоторых типов магнитов.

В предлагаемый обзор включены описания лишь некоторых сверхпроводящих магнитов, дающие представление о современном уровне развития этой области техники.

ИМПУЛЬСНЫЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ И СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРИТЕЛИ

Во многих лабораториях, ведущих исследования в области физики высоких энергий, разрабатываются проекты сверхпроводящих кольцевых ускорителей и ускорительно-накопительных комплексов (см. таблицу 1).

Проекты сверхпроводящих ускорителей появились сразу после открытия жестких сверхпроводников второго рода. Однако только в результате создания сверхпроводников, удовлетворяющих требованиям ускорительной техники и имеющих приемлемые потери в импульс-

Таблица 1. Параметры некоторых проектируемых кольцевых сверхпроводящих ускорителей-накопителей

Организация	ЮБЭ	ОМНИ	FNAL ¹⁾	BNL ²⁾	LBL ³⁾	LBL/SLAC ⁴⁾	AML ⁵⁾	KEK ⁶⁾
Название комплекса	УНК	Фукуо-ТЮН	Doublet	Isabelle	ESCAR	PEP	SSR	TRISTAN.
Литература	/1/	/2/	/3/	/4/	/5,6,7/	/8/	/9/	/10/
Макс. энергия на протон	ГэВ	2000	31,2	1000	200	4,2	200	12
Длительность цикла	с	114	14	50 ^{м)}	120 ^{м)}	10	-	100 ^{м)}
Интенсивность в ускорительном режиме, частиц в импульсе		$5 \cdot 10^{14}$	10^{11+12}	-	-	$2 \cdot 10^{12}$	-	-
Макс. светимость встреч-ных пучков	$\text{см}^{-2}\text{с}$	10^{33}	-	-	10^{33}	-	10^{32}	$7,5 \cdot 10^{31}$
Периметр комплекса	км	15	0,250	6,280	2,018	0,05	2,167	0,2
Длина диполя	м	7	3,2	6,1	4,25	1	5	0,8
Длина квадруполя	м	2,2	0,5	2,1	1,3	-	1,2	0,4
Макс. индукция диполя	Т	4,8	5	4,5	4	4,6	4,4	3
Диаметр апертуры	мм	60	80	75	80	65	110	100
Макс. ток, дipoля	А	5500	2400	5000	3300	2500	-	190
Мощность рефрижераторов при 4,2 К	кВт	40	3	-	20	1,5	9	-

*) Длительность ускорения

Примечания: 1) FNAL - Национальная ускорительная лаборатория им. Э. Ферми, Батавия, США
 2) BNL - Брукхэвская национальная лаборатория, Брукхэвен, США
 3) LBL - Лоуренсовская лаборатория, Беркли, США
 4) SLAC - Стенфордский центр линейных ускорителей, Стенфорд, США
 5) AML - Аргоннская национальная лаборатория, Аргонн, США
 6) KEK - Национальная лаборатория физики высоких энергий, Моракаси, Япония

ном режиме работы, возникла реальная возможность создания сверхпроводящих ускорителей. Известно, что радиус синхротрона обратно пропорционален величине индукции магнитного поля. Следовательно, использование сверхпроводящих магнитов позволит создать ускоритель, радиус которого в несколько раз меньше радиуса ускорителя на такую же энергию, но с обычными магнитами (для магнитов с индукцией 5 Т в два-три раза), что значительно снизит капиталовложения либо даст возможность при тех же капиталовложениях соорудить сверхпроводящий ускоритель на более высокие энергии. Расчеты показывают, что эксплуатационные затраты для сверхпроводящих ускорителей, создаваемых на основе уже существующих сверхпроводников, значительно меньше, чем для обычных ускорителей. Несомненно, что ожидаемое в связи с новыми разработками улучшение параметров сверхпроводников (повышение критических температуры и поля, уменьшение удельных потерь энергии при работе в импульсном режиме, снижение стоимости) в еще большей мере будет стимулировать создание сверхпроводящих ускорителей.

Многие лаборатории и институты физики высоких энергий создали и исследовали значительное число разнообразных в конструктивном и технологическом отношении импульсных дипольных сверхпроводящих магнитов (см. рис. 1 и 2) с параметрами, удовлетворяющими требованиям ускорительной техники. Параметры ряда дипольных магнитов, созданных в последнее время, представлены в таблице 2. Как видно из таблицы, имеются импульсные дипольные магниты с индукцией 4-5 Т, однородностью поля в рабочей апертуре 10^{-3} и выше, скоростью нарастания поля до 3 Т/с и динамическими потерями менее 20 Вт/м. Некоторые из них проработали непрерывно около 10^5 циклов^{17/}.

В последние годы создаются полномасштабные прототипы импульсных диполей проектируемых кольцевых ускорителей^{3,5,13/}. Наибольшее количество различных типов дипольных магнитов создано и исследовано в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США, Батавия) в связи с созданием сверхпроводящего уско-

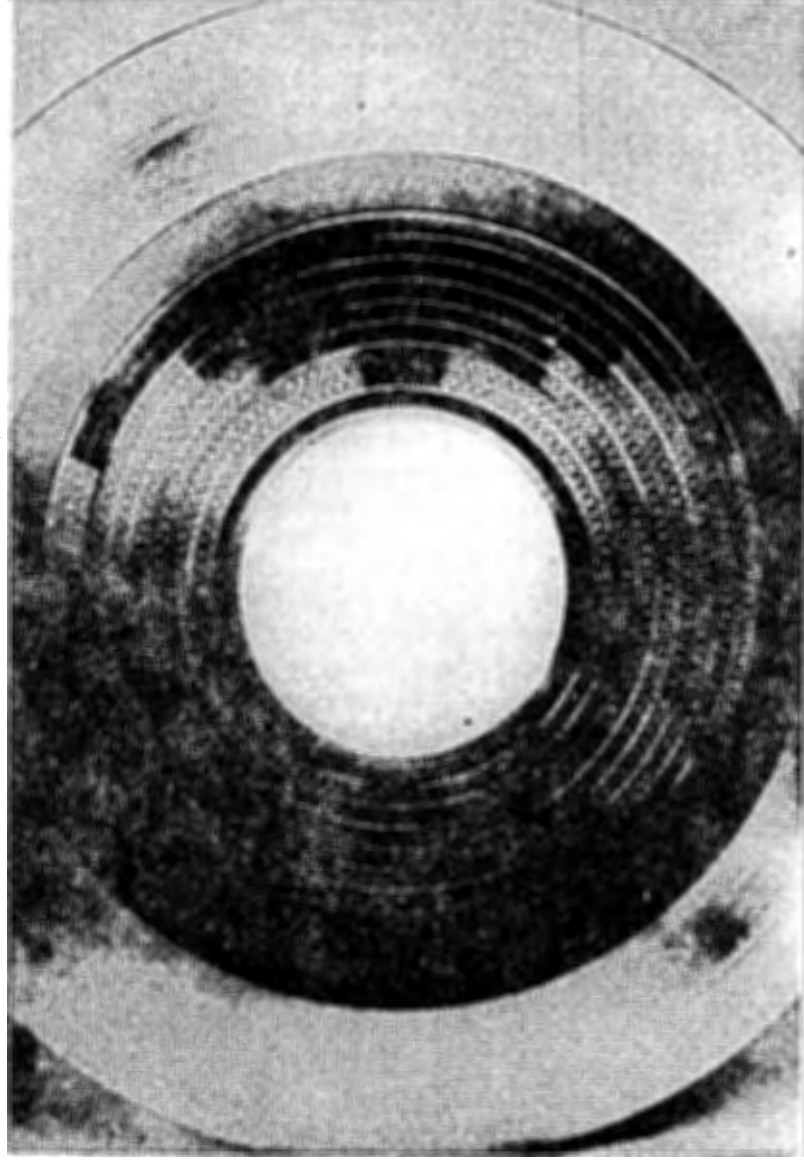


Рис. 1. Сечение импульсного дипольного магнита СПД-3^{/12/}.

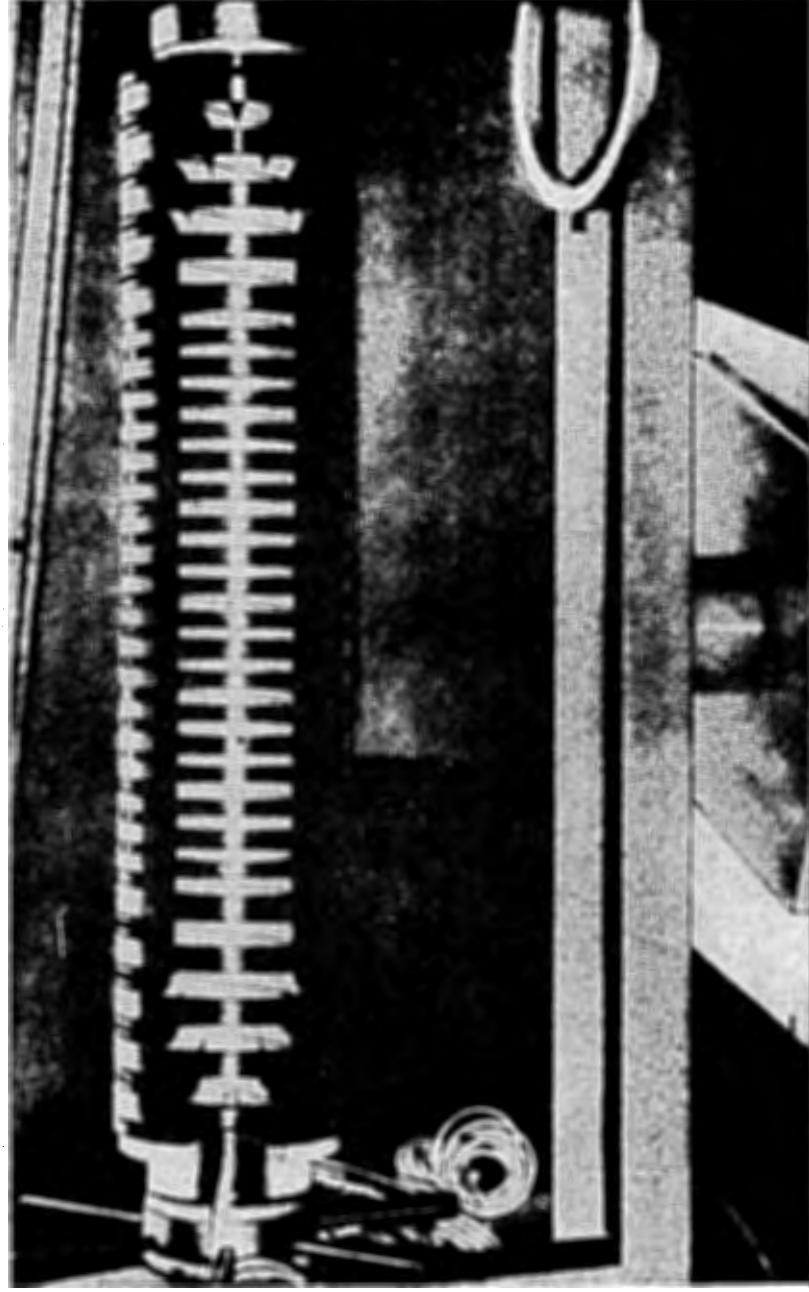


Рис. 2. Магнит СПД-3 после намотки ^{/12/}.

Таблица 2. Параметры некоторых импульсных дипольных магнитов

Лаборатория	РТИ ¹⁾		FMAL	BML	RHEL ²⁾		SEN ³⁾		IECR ⁴⁾
	СИ-3	Е			ISA	AC-5	AJEC	D-2a	
1	2	3	4	5	6	7	8		
Итература	/11,12/	/3/	/13/	/14/	/15/	/16,17/			
Год создания	1974	1975,1976	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1973,1974
Внутренний диаметр обмотки	мм 85	~ 80	120	~ 100	110	80			
Длина	м 0,67	2,0; 6,0	4,25	1,0	1,5	1,5			
Расчетное поле	Т 4	4,5	4	4,5	5	5,5			
Достигнутое поле (после числа переходов)	Т 3,4 (70)	-	3,6 (13)	5,2 (8)	5 (45)	5,4 (7) 4,5*			
Достигнутое поле перед первым переходом	Т 2,2	-	-	4	3,3	4,5 2,5*			
Однородность поля	3·10 ⁻⁴ в 50% апертуры	-	10 ⁻³ в 85% апертуры	10 ⁻³ в апертуру res d=80 мм	4·10 ⁻⁴ в апертуру 70% апер- туры	3·10 ⁻³ в апертуре d=60 мм			
Железный экран	нет	теплый	холодный	холодный	холодный	холодный			
Макс. ток	А ~ 1600	5000	3380	3300	2000	1750			

Таблица 2. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8
Проводник:							
Тип кабеля	штенка	скрутка	штенка	скрутка	скрутка	скрутка	скрутка
Сечение кабеля	мм ² 2,5х3,5	1,25х7,5	0,061х16,86	1,86х8,28	2,7х4,65	-	-
Число проводов	24	25	97	15	6-1 медная	12-1 медная	
Диаметр проводов	мм 0,44	0,6	0,305	1,08	0,52	-	
Диаметр жил	мм 10	7	10	7,1	10	12	
Число жил в проводе	1000	2300	517	8917	1045	1000	
Сл: NbTi: CuNi	1:1:0	-	1,25:1:0	0,45:0,4: :0,15	1,6:1:0	1:1:0	
Шаг скрутки	мм 2	-	8	-	6	4	
Шаг транспозиции	мм 6,1	-	-	-	-	30	
Минимальное время нараста- ния поля	с 5	5	-	1,25	5	5	
Тип охлаждения обмотки	кислород- гелий, каналы и тепловые мости	сверхжид- кислород + кислород гелий, тепловые мости	кислород гелий	кислород гелий, каналы	кислород гелий, тепловые мости	кислород гелий, тепловые мости	кислород гелий, тепловые мости

*) Без алюминиевых бандажей

**) Пропитан припоем

Примечания:

- 1) РТИ - Радиотехнический институт Академии Наук СССР, Москва, СССР
- 2) RHEL - Резерфордская лаборатория высоких энергий, Чилтон, Великобритания
- 3) SEN - Центр ядерных исследований, Сакле, Франция
- 4) IECR - Институт экспериментальной ядерной физики центра в Карлсруэ, ФРГ

рителя "Doubler". Здесь начато серийное изготовление дипольных магнитов длиной 6 м каждый^{/3/}.

Экспериментальные исследования позволили разрешить многие проблемы, связанные с применением импульсных сверхпроводящих дипольных магнитов в ускорительной технике, и тем самым обусловили возможность создания сверхпроводящего ускорителя в ближайшие годы. Вместе с тем, имеется ещё целый ряд нерешенных до конца вопросов.

Одним из важнейших является стабильность магнитов при их длительной работе в циклическом режиме и в условиях периодического отепления-охлаждения.

Недостаточно изучена и проблема радиационной стойкости материалов, возникающая в особенности при использовании сверхпроводящих магнитов в тех системах ускорителя, где возможно их интенсивное облучение (например, на вводе и выводе пучка из кольца).

Причины деградации и тренировки магнитов также требуют тщательного изучения, хотя в последние годы им уделяется значительное внимание.

Некоторые магниты^{/11,12,15-17/} достигали предельных значений поля только после десятков (вплоть до ста) переходов в нормальное состояние, т.е. в них существенно проявлялся эффект тренировки. Имеются магниты^{/3,4/}, в которых уже после нескольких переходов было достигнуто предельное значение поля. Как показывает опыт^{/16/}, укрепление обмотки алюминиевыми бандажами значительно снижает эффект тренировки и приводит к повышению значения поля, при котором магнит первый раз переходит в нормальное состояние.

В современных импульсных магнитах уровень деградации относительно невысок ($80 \div 90\% I_c$), что, в конечном счете, ведет к увеличению необходимого количества сверхпроводящих материалов, но не является принципиальной преградой для использования сверхпроводящих магнитов в ускорителях.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА В УСКОРИТЕЛЯХ И КАНАЛАХ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ УСКОРЕННЫХ ЧАСТИЦ

Перспективным методом ускорения тяжелых заряженных частиц является так называемый метод коллективного ускорения ионов, находящихся внутри электронных колец^{/18/}. Кольца пролетают через систему последовательных резонаторов, расположенных в продольном магнитном поле, необходимом для поддержания вращательного движения электронов в кольцах.

В качестве вероятного прообраза ускоряющей системы коллективного ускорителя в ОИЯИ создана криогенная высокочастотная ускорительная секция "Кольцетрон"^{/19/}. Секция (рис.3) состоит из четырех резонаторов цилиндрического типа (резонансная частота 500 МГц), сверхпроводящих соленоидов постоянного тока, создающих управляющее магнитное поле, и рефрижераторной системы. Рабочая длина секции 1,6 м, ожидаемая энергия ускоренных протонов ~0,4 ГэВ. Резонаторы охвачены основным соленоидом СПС-600 (см. таблицу 3).

Таблица 3. Параметры соленоидов "Кольцетрона"^{/19/} и "Криона"^{/21/}

Обозначение		СПС-600	СПС-170	СПС-50
Магнитное поле в центре	Т	2	0+0,23	1,28
Внутренний диаметр обмотки	см	59,6	17,0	5,0
Наружный диаметр	см	62,4	20,2+20,8	
Длина	см	235,2	1,65	120
Номинальный ток	А	2440	0+50	80
Плотность тока в обмотке	А/см ²	$1,14 \cdot 10^4$	$0+1,3 \cdot 10^4$	
Индуктивность	Гв	0,375	0,14	0,54
Запасенная энергия	Дж	$1,06 \cdot 10^6$	0+175	1750
Проводник:			}	
Размеры сечения	мм	5x2,5	Ø 0,5	
Материалы		NbTi+Cu	Nb-50%Ti+Cu	
Отношение сечений		2:1	3:1	
Диаметр жилы	мкм	60	65	
Количество жил		1500	19	
Шаг скрутки жил	мм	35	30	

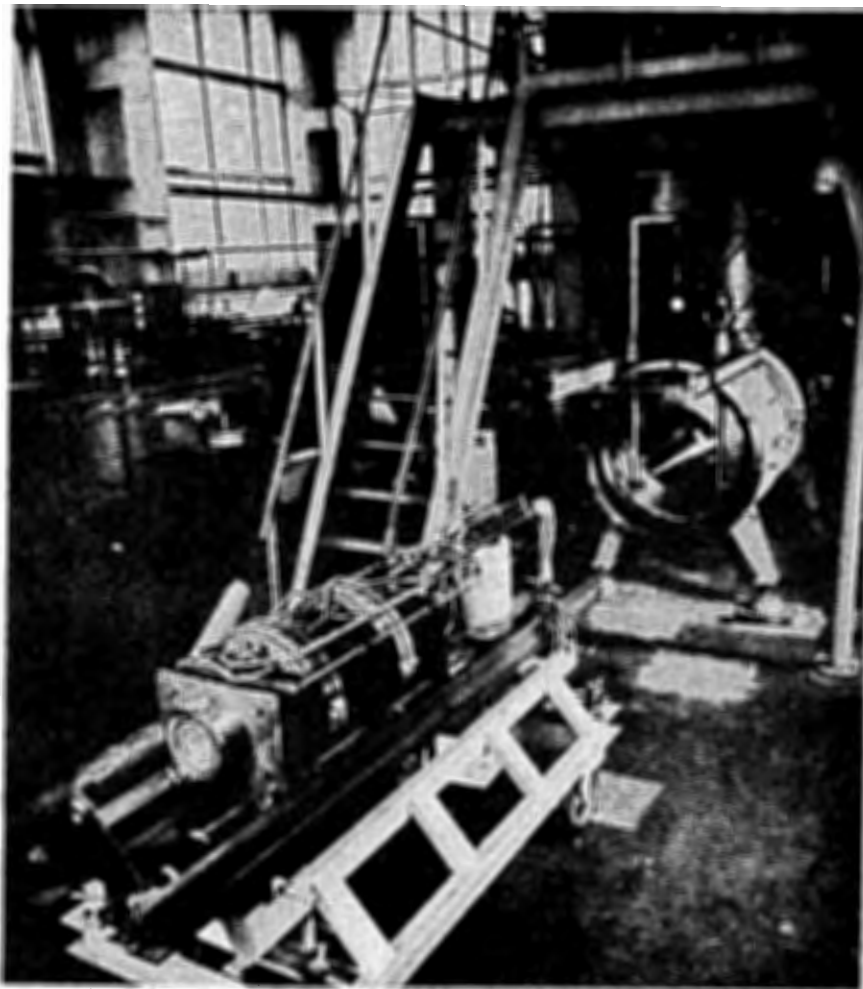


Рис. 3. Криогенная высокочастотная ускорительная секция "Кольцетрон"^{/19/}. На переднем плане - сборка из резонаторов и соленоидов СПС-170, на заднем плане - вакуумный кожух с криостатом для СПС-600.

Между резонаторами размещены 5 секционированных соленоидов, каждый из которых содержит 16 сверхпроводящих катушек СПС-170 (см. там же), с индивидуальным электропитанием. Соленоиды предназначены для создания пилообразного магнитного поля с максимальным значением 2 Т и 5±10-процентной модуляцией, которая позволяет обеспечить равномерное ускорение электрон-ионных колец. Резонаторы выполнены из меди, на внутреннюю поверхность нанесено NbTi-покрытие толщиной 10 мкм. Гелиевая система кольцетрона базируется на оживителе производительностью ~ 60 литров жидкого гелия в час (~ 250 Вт в рефрижераторном режиме).

Сверхпроводящие магниты постоянного тока получили широкое применение также в каналах для транспортировки частиц. Осуществлен оригинальный проект мюонного канала^{/20/}. Продольное магнитное поле на длине 8 м создается системой из 16 сверхпроводящих соленоидов на 5 Т, находящихся в вакуумированном кожухе. Соленоиды термостатируются при 4,7 К сверхкритическим гелием, находящимся под давлением 6-10 атм, который течет по медным трубкам, навитым на пропитанную эпоксидом обмотку соленоида. Этот вид термостатирования можно назвать косвенным, так как обмотка не погружается непосредственно в жидкий гелий.

Косвенное термостатирование сверхпроводящего соленоида применено и в криогенном электронно-лучевом источнике многозарядных ионов ("Крион")^{/21/}. Однако здесь соленоид СПС-50 (см. таблицу 3) скреплен болтами с медной ванной, содержащей запас жидкого гелия.

Обычно каналы для транспортировки частиц содержат отклоняющие дипольные и фокусирующие квадрупольные магниты. Примером таких сверхпроводящих магнитов могут послужить квадрупольный дублет "Orsay" и два дипольных магнита "Cesar", изготовленные в Сакле (Франция) и использованные в ЦЕРНе^{/22/} (см. таблицу 4). В Аргоннской национальной лаборатории (США) в феврале 1976 года начал функционировать канал для транспортировки к спектрометру^{/23/} поляризованных протонов с энергией 12 ГэВ/с. Канал состоит из 10 сверхпроводя-

Таблица 4. Параметры некоторых дипольных и квадрупольных магнитов постоянного тока

	Диполи		Квадруполи	
	CEN	ANL	CEN	ANL
Лаборатория	Cesar	-	Orsac	-
Название магнита	Cesar	-	Orsac	-
Литература	/22/	/23/	/22/	/23/
Магнитное поле в центре	T	4,57	2,6	-
Номинальный градиент	T/м	-	-	35
Внутренний диаметр обмотки	см	15	7,6	18,5
Магнитная длина	см	212	91	95
Номинальный ток	A	860(85%I _c)	160(85%I _c)	600(75%I _c)
Плотность тока в обмотке	A/см ²	2,5·10 ⁴		2,45·10 ⁴
Запасенная энергия	Дж	0,52·10 ⁶		
Проводник:				
Размеры сечений	мм ²	2,2x1,3		2x1
Материалы		NbTi+Cu		NbTi+Cu
Отношение сечений		2:1		2:1
Диаметр жил	мм			50
Количество жил				361

ших квадрупольей (см. там же), размещенных в четырех криостатах. Проведены опыты по воздействию пучка протонов на магниты.

В Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (США) изготовлены четыре крупных отклоняющих магнита, которые используются для проведения экспериментов в области физики высоких энергий^{/24/}. Размеры и рабочие параметры этих магнитов лежат в следующих пределах:

общий вес	65÷165 Т;
запасенная энергия	300÷2000 кДж;
напряженность магнитного поля	18÷20 кЭ;
рабочий ток	200 А;
запас жидкого азота	170÷200 л;
расход азота	18÷25 л/сутки;
запас гелия	500÷600 л;
расход гелия	36÷50 л/сутки.

Создатели этих магнитов поставили перед собой цель: при тех же капитальных затратах и степени надежности работы (время отключения из-за поломок), что и у обычных магнитов, добиться снижения общего потребления энергии непрерывно работающего магнита до величины, составляющей менее 10% от энергии, потребляемой обычными магнитами.

Большой группой авторов^{/25/} разработан и находится в стадии изготовления сверхпроводящий магнит "Гиперон-1" с индукцией 6 Т, предназначенный для канала короткоживущих частиц. Диаметр теплового отверстия магнита - 100 см, запасенная энергия - 24 МДж. Магнит снабжен железным ярмом. Предусмотрен ряд устройств электрической и пневматической защиты на случай перехода обмотки в нормальное состояние.

МАГНИТЫ ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Детекторы заряженных частиц обычно размещают в магнитном поле, чтобы по кривизне треков получать сведения об энергии и типе этих частиц. Самые крупные магниты требуются для жидководородных пузырьковых камер. Параметры сверхпроводящих магнитов крупнейших из находящихся в эксплуатации водородных пузырьковых камер^{/26/} приведены в таблице 5.

Таблица 5. Сверхпроводящие магниты водородных пузырьковых камер^{/26/}

Лаборатория		BNL	ANL	FNAL	CERN
Обозначение камеры		7 фут	12 фут	15 фут	BEBC
Индукция в центре	T	2,8	1,8	3,0	3,5
Номинальный ток	кА	5,6	2,0	5,0	5,7
Внутренний диаметр обмотки	м	2,44	4,78	4,27	4,72
Внешний диаметр обмотки	м	2,76	5,28	5,08	6,0
Высота обмотки	м	2,4	3,04	2,89	4,4
Запасенная энергия	МДж	64	80	400	830

Рассмотрим некоторые особенности магнита камеры ВЕВС*, одной из крупнейших в мире. Сверхпроводник этого магнита изготовлен в виде полностью стабилизированной шины и состоит из 200 ниобий-титановых жил диаметром 200 мкм, находящихся в медной матрице с сечением $61 \times 3 \text{ мм}^2$ /27/. Шина укладывается в обмотку магнита вместе с бандажной стальной лентой и перфорированной изоляционной лентой, допускающей проникновение к шине жидкого гелия. Максимальная индукция в обмотке 5,1 Т, силы сжатия между половинами обмотки составляют 9000 т. Рефрижератор для водородной камеры и магнита имеет холодопроизводительность в рефрижераторном режиме 25 кВт при 22 К (в ожижительном режиме 1000 л жидкого водорода в час) и 1,5 кВт при 4,4 К (в ожижительном режиме 700 л жидкого гелия в час). Магнит выполнен сверхпроводящим для получения повышенной магнитной индукции, что улучшает точность измерения энергии частиц. Другой важной целью использования сверхпроводника является экономия электроэнергии. Для обычного магнита с такими же индукцией и объёмом магнитного поля потребовалась бы мощность 70 МВт, а камера вместе со сверхпроводящим магнитом потребляет всего 1 МВт.

Менее крупными являются магниты "Pluto" в DESY/28/** и "Омега" в ЦЕРНе /29/.

Магнит "Pluto" установлен на месте пересечения пучков электронно-позитронного накопителя. Внутренний диаметр магнита 1,4 м, внешний диаметр 2,04 м и длина 1,15 м. При номинальном токе 1,2 кА магнитная индукция в центре составляет 2 Т, запасенная энергия 4,2 МДж. Сверхпроводник состоит из 210 ниобий-титановых жил диаметром 100 мкм, заключенных в медную матрицу, отношение сечения меди к сечению сверхпроводника равно 14,5.

Магнит "Омега" выполнен в виде катушек Гельмгольца, установленных на расстоянии 1,5 м друг от друга.

* ВЕВС - Большая европейская пузырьковая камера.

** DESY - Немецкий электронный синхротрон, Гамбург, ФРГ.

Внутренний диаметр 3 м, магнитная индукция 1,8 Т. В магните расположены мишень с жидким водородом и искровые камеры. Обмотка изготовлена из медных полых трубок, на которых припаяны сверхпроводники. По трубкам происходит принудительная циркуляция жидкого гелия. Таким образом достигается хорошее охлаждение при малом количестве запасенного гелия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в настоящем обзоре данные свидетельствуют о том, что в мире накоплен большой опыт создания сверхпроводящих магнитных систем и в ряде лабораторий изготовлены исключительные по размерам и сложности уникальные сверхпроводящие магниты. Переход к серийному производству сверхпроводящих магнитов связан с преодолением ряда трудностей. Необходимы специальное обучение кадров, разработка относительно простой технологии изготовления прецизионных обмоток, выпуск мощных, экономичных и автоматизированных рефрижераторов. Требуются также дополнительные исследовательские и инженерные разработки. Ход развития этой области техники позволяет ожидать широкого применения сверхпроводящих магнитных систем в ближайшие годы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.М.Адо и др. Ускорительно-накопительный комплекс на энергию 2 ТэВ. В кн. Труды 4 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., "Наука", 1975, т.1, стр. 44-51.
2. А.М.Балдин и др. Нуклотрон - ускорительный комплекс релятивистских ядер в ЛВЭ ОИЯИ. В кн. Труды 4 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., "Наука", 1975, т.2, стр. 4-8.
3. 1000 GeV next stop. CERN Cour., Vol.16, No. 1, pp. 12-13 (1976).
4. Q.Barton. Isabelle - Superconducting Storage Accelerator. В кн. Труды 4 Всесоюз-

- ного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., "Наука", 1975, т. 1, стр. 53-58.
5. W.S.Gilbert et al. ESCAR Superconducting Magnet System. LBL - 3688, Berkeley, 1975.
 6. R.Byrns and M.A.Green. The ESCAR Helium Refrigeration System. LBL - 3314, Berkeley, 1975.
 7. T.Elioff et al. ESCAR - First Superconducting Synchrotron Storage Ring. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG - 11, No. 2, pp. 447-450 (1975).
 8. A Proposal for a Positron - Electron Colliding - Beam Storage Ring Project (PEP). LBL - 2688, SLAC 171, Berkeley - Stanford, 1974.
 9. J.R.Purcell et al. Magnets for the ZGS Superconducting Stretcher Ring. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG - 11, No. 2, pp. 455-458 (1975).
 10. K.Kikuchi. A Preliminary Design for TRISTAN, Tri - Ring Intersecting Storage Accelerators in Japan. Proc. of the 5-th Int. Cryogenic Eng. Conf., Kyoto (1974) pp. 514-516.
 11. В.П.Алексеев и др. Разработка сверхпроводящих дипольных магнитов для протонных синхротронов на сверхвысокую энергию (сверхпроводящий дипольный магнит СПД-3). В кн. Труды 4 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., "Наука", 1975, т.2, стр.126-131.
 12. V.P.Alexeev et al. Superconducting Dipole Magnet SPD -3. Proc. of 5-th Int. Conf. on Magnet Technology, Roma (1975), pp. 572-576.
 13. A.D.McInturff et al. Full-Scale ISA Dipoles. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS - 22 (1975) No. 3, pp. 1133-1136.

14. J.H.Coupland. The Pulsed Superconducting Magnet AC-5. Proc. of 5-th Int. Conf. on Magnet Technology, Roma (1975), pp. 535 -539.
15. G.Bronca et al. The Superconducting Pulsed Dipole "Alec". Proc. of 5-th Int. Conf. on Magnet Technology, Roma (1975), pp. 525-529.
16. P.Turowski. Transient Phenomena and Quench Propagation in a Pulsed Dipole Magnet. Proc. of 5-th Int. Conf. on Magnet Technology, Roma (1975), pp. 541-545.
17. W.Heinz. Pulsed Superconducting Magnets for High-Energy Physics. Proc. of 5-th Int. Cryogenic Eng. Conf., Kyoto (1974), pp. 517-522.
18. В.И.Векслер и др. Препринт ОИЯИ, P2-3440, Дубна, 1967; А.Э., 24, 317, 1968.
19. Ju.V.Muratov, N.B.Rubin, V.P.Sarantsev, Ju.A.Shishov, Ju.I.Smirnov, A.G.Zeldovich. Research Performances on Superconducting Devices for Collective Accelerator in JINR. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS - 22, No. 3, pp. 1003 - 1005, 1975.
20. CERN-Courier, No. 2, Vol. 15, 1975, pp. 36-37.
21. В.Г.Аксенов, Е.Д.Донец, А.Г.Зельдович, А.И.Пикин, Ю.А.Шишов. Сообщение ОИЯИ, P8-8563, Дубна, 1975.
22. F.Kircher. Past, Present and Future of the Work on Superconducting Magnets at Saclay. National Laboratory for High Energy Physics, Japan, KEK - 75 - 14, December 1975.
23. CERN-Courier, No. 3, Vol. 16, 1976, pp. 96-97.

24. J.Heim, R.Fast. Engineering Design and Analysis of Large Superconducting Particle Analysis Magnets. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG - 11, No. 2, 1975, pp. 471-475.
25. I.A.Vetlitsky et al. Superconducting 6 T Magnet for the Short Lived Particles Beams at ITER Synchrotron. Proc. of 5-th Int. Conf. on Magnet Technology, Roma, 1975, pp. 42-44.
26. W. Heinz. Superconducting Magnets for High-Energy Physics. Proc. of 5-th Int. Conf. on Magnet Technology, Roma, 1975, pp. 1-8.
27. G.Harigel. Die Grosse Europäische Blasen-kammer im CERN. Physikalische Blätter No. 1, Vol. 31, 1975, pp. 13-18.
28. E.Eschrich et al. The Operation of a Three Coil 5 Megajoule Superconducting Magnet System at the Electron-Positron Storage Ring DORIS. Proc. of 5-th Int. Conf. on Magnet Technology, Roma, 1975, pp. 85-92.
29. O.Gildemeister. The CERN Omega Spectrometer. Proc. of 8-th Int. Conf. on Instrumentation for High-Energy Physics, Frascati, 1973, pp. 669-671.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 сентября 1976 года.