

УДК 538.945

**СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ
В СПЕКТРОМЕТРАХ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

Ю. А. Шишов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	844
СОЛЕНОИДЫ ДЛЯ ВОДОРОДНЫХ ПУЗЫРЬКОВЫХ КАМЕР	845
СОЛЕНОИДЫ ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРОВ НА ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКАХ	846
ДИПОЛЬНЫЕ МАГНИТЫ	857
ТОРОИДАЛЬНЫЕ МАГНИТЫ	868
МАГНИТЫ ДЛЯ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ МИШЕНЕЙ	877
МАГНИТЫ ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРОВ КОСМИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ	879
МАГНИТЫ ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА	883
ВЫВОДЫ	885
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	886

УДК 538.945

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ В СПЕКТРОМЕТРАХ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Ю. А. Шишов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлен обзор сверхпроводящих магнитов для спектрометров частиц высоких энергий. Магниты классифицированы по назначению спектрометров и по форме обмоток. Приведены данные о термостатировании и электрической защите обмоток. Описаны конструктивные особенности магнитов различного назначения. Первые крупные сверхпроводящие соленоиды были сооружены для установок с водородными пузырьковыми камерами. Дальнейший прогресс был связан с созданием спектрометров для встречных пучков, в которых использовались соленоиды с радиационно-прозрачными стенками. Наряду с соленоидами в спектрометрах использовались дипольные и тороидальные магниты, конструкции некоторых из них также рассматриваются в обзоре. Особый класс поляризующих соленоидов применяется в поляризованных мишенях. Для исследований по астрофизике созданы спектрометры с магнитами, имеющими различные формы обмоток. В качестве примера представлены оригинальный радиационно-прозрачный соленоид и дипольный магнит с криокулером. Перспективы развития магнитов связаны с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Приведены сведения о современном состоянии технологии изготовления ВТСП-лент и соленоидов.

A retrospective review of superconducting magnets for spectrometers of high energy particles is given. The magnets are classified according to the purpose of the spectrometers and the winding shape. The data on thermostabilization and electrical protection of the winding are presented. The design features of magnets for different application are described. The first large superconducting solenoids were constructed for set-ups with hydrogen bubble chambers. The further progress was related with the development of spectrometers for colliding beams, where the solenoids with radiation-transparent walls were used. The dipole and toroidal magnets were applied in the spectrometers alongside with the solenoids. The construction of some of them is also considered in the review. A special class of polarizing solenoids is used in polarized targets. The spectrometers with magnets of different winding shapes have been manufactured for astrophysics studies. An original radiation-transparent solenoid and a dipole magnet with a cryocooler, are given as an example. The perspective to develop the magnets is related with using high temperature superconductors (HTS). The status of HTS ribbon and solenoid production process is presented.

ВВЕДЕНИЕ

В экспериментальной физике элементарных частиц широко используются различные по конструкциям и размерам сверхпроводящие магниты (СПМ). Их можно классифицировать по функциям и по формам обмоток, способу криостатирования и другим основным параметрам. Во всех элементах технологической цепочки получения, ускорения, транспортировки, формирования

и детектирования пучков ускоренных частиц обязательно присутствуют магниты. В соответствии с назначением магниты можно разделить на следующие группы: для источника частиц, для ускорителей (импульсного и постоянного тока), для вывода, транспортировки и формирования пучков и, наконец, магниты для спектрометров частиц. Последние и являются предметом настоящего обзора. Эти магниты также можно разделить по применению: для жидководородных пузырьковых камер, для спектрометров на встречных пучках и т. д.

Существенное влияние на конструкцию оказывает форма обмоток — соленоидальная, дипольная, тороидальная и др.

По способу криостатирования различаются магниты с обмотками, погруженными в жидкий гелий, и магниты с «сухими» обмотками. Последние находятся в вакуумном пространстве и охлаждаются с помощью теплопроводов (так называемое косвенное криостатирование). При этом гелий либо содержится в сосуде, либо циркулирует по трубкам. В последние годы также применяются безгелиевые технологии. Для охлаждения используются автономные газовые холодильные машины, так называемые криокулеры.

Существенным признаком классификации также является способ защиты обмоток при их переходе в нормальное состояние. Различают активные и пассивные способы защиты. В активных устройствах защиты предусматривается раннее обнаружение нормального состояния и последующая эвакуация энергии на внешний поглотитель или управляемый подогрев всей обмотки с помощью резисторов. В пассивных устройствах условия для равномерного нагрева обмотки обеспечиваются различными способами, например, с помощью теплопроводов, секционирования обмотки и др. Все перечисленные элементы классификации в той или иной степени рассмотрены в обзоре.

Настоящий обзор не претендует на полноту охвата сведений о всех существующих СПМ, используемых в экспериментальной физике элементарных частиц. Обзор написан в связи с разработкой эскизного проекта сверхпроводящего дипольного магнита для коллаборации ALICE, CERN, а также с созданием некоторых СПМ в ОИЯИ. Однако автор надеется, что обзор будет полезен для физиков-экспериментаторов и инженеров, создающих новые экспериментальные установки.

1. СОЛЕНОИДЫ ДЛЯ ВОДОРОДНЫХ ПУЗЫРЬКОВЫХ КАМЕР

Самые крупные соленоиды созданы для жидководородных пузырьковых камер (табл. 1). Эти магниты изготовлены давно и достаточно полно представлены в литературе (см., например, [1]).

В качестве примера рассмотрим некоторые особенности магнита камеры ВЕВС. Потребление энергии камерой вместе со сверхпроводящим магнитом

Таблица 1. Параметры сверхпроводящих соленоидов для водородных пузырьковых камер [2]

Параметр	12-футовая (ANL, США)	7-футовая (BNL, США)	15-футовая (FNAL, США)	ВЕВС (CERN, Швейцария)
Год пуска	1969	1970	1972	1972
Индукция в центре, Тл	1,8	3,0	3,0	3,5
Внутренний диаметр обмотки, м	4,78	2,44	4,27	4,72
Внешний диаметр, м	5,28	2,76	5,08	6,0
Высота (длина), м	3,04	2,40	2,89	4,4
Номинальный ток, кА	2,0	6,0	5,0	5,7
Плотность тока в обмотке, $A \cdot mm^{-2}$	8	25	19	10
Запасенная энергия, МДж	80	61	400	830
Проводник:				
плотность тока, $A \cdot mm^{-2}$	15,5	60	37	31
размеры сечения, мм	$50,8 \times 2,54$	50×2	$37 \times 3,8$	61×3
Материал матрицы	Cu	Cu	Cu, припой	Cu
Отношение сечений Cu/NbTi	24:1	6:1	20:1	26:1
Диаметр жилы, мкм	—	—	380	193–230
Количество жил	6	—	60	200–224

составляет 1 МВт (теплый магнит потребовал бы 70 МВт). Общая мощность, необходимая для работы соленоида, составляет 360 кВт. Обмотка магнита выполнена из криостатически стабилизированной шины и погружена в ванну с жидким гелием. Для восприятия радиальных поперечных сил шина уложена в дисковые обмотки вместе со стальной бандажной лентой, а также с перфорированной изоляционной лентой, допускающей проникновение к шине жидкого гелия. Обмотка состоит из двух секций, размещенных в отдельных сосудах. Каждая из секций содержит 20 дисков, разделенных стеклотекстолитовыми пластинами, которые обеспечивают передачу сил сжатия между секциями и охлаждение каждого диска.

2. СОЛЕНОИДЫ ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРОВ НА ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКАХ

В отличие от установок с водородными пузырьковыми камерами, где регистрация заряженных частиц происходит внутри камер и, следовательно, внутри соленоида, в экспериментах со встречными пучками возникает необходимость регистрации частиц и за пределами соленоидов. Это обстоятельство приводит к появлению ряда новых требований к конструкции СП-соленоидов.

1. Большой объем магнитного поля (диаметр и длина вдоль пучков тепловой апертуры от одного до нескольких метров).

2. Сравнительно малая величина индукции магнитного поля (от 0,5 до 2,0 Тл).

3. Минимальное количество материала в стенках магнита на пути частиц, вылетающих из внутреннего объема магнита; в соленоидах, упоминаемых в обзоре, радиационные толщины находятся в диапазоне от 0,5 до 1,1 (радиационная толщина характеризует степень поглощения γ -квантов в стенке соленоида).

4. Высокая надежность.

Требования 1 и 2 являются достаточно распространенными, и для их выполнения выработаны традиционные решения. Высокая надежность совершенно необходима для работы на ускорителях.

Задача измерения характеристик частиц за пределами магнитного поля требует минимизации взаимодействия частиц с материалом деталей магнита. Для решения этой задачи необходимо уменьшить толщины обмотки и стенок криостата, а также заменить тяжелые материалы на легкие. Покажем на нескольких примерах, как постепенно находились пути, позволяющие сделать стенки магнита относительно радиационно-прозрачными.

2.1. Магнит «Pluto». Первым сверхпроводящим магнитом, построенным в 1972 г. специально для спектрометра на электронно-позитронных встречных пучках, является магнит «Pluto» (табл. 2, рис. 1) [3, 4]. Криостат и обмотка магнита построены по технологии, традиционной для криостатической стабилизации сверхпроводника. Поэтому радиационная толщина велика и равна 4,0. Для такой стабилизации характерны низкие плотности тока в проводнике и обмотке и соответственно большая толщина обмотки. Стабилизированная шина имеет медную матрицу, сечение которой в 17 раз превышает сечения сверхпроводника. Полная масса магнита составляет 120 т. Криостатирование производится с помощью замкнутого рефрижераторного цикла, мощность рефрижератора равна 100 Вт.

2.2. Магнит ISR. На построенном в 1976 г. в CERN магните ISR (табл. 2) [5–7, 10] впервые заменили такие тяжелые материалы, как медь и нержавеющая сталь, на легкие. Здесь матрица сверхпроводящей шины выполнена из алюми-

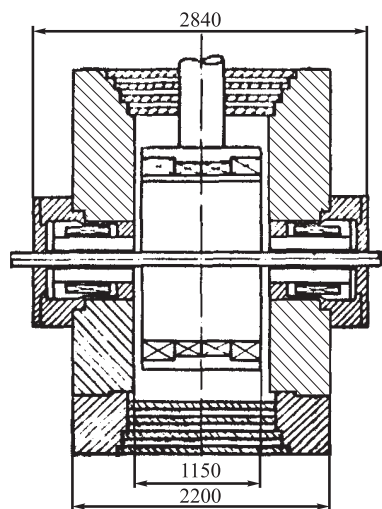


Рис. 1. Магнит «Pluto» [4]

Таблица 2. Параметры сверхпроводящих соленоидов для спектрометров на встречных пучках (1972–1984 гг.)

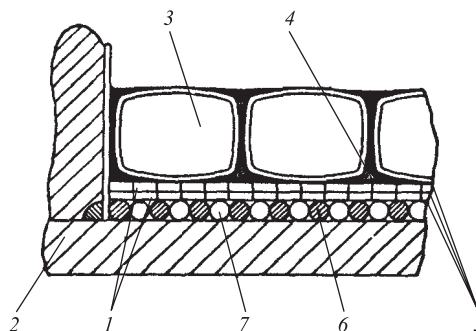
Параметр	«Pluto» (DESY)	ISR (CERN)	CELLO (CERN)	TPC (LBL)	CLEO (Cornel Univ.)	CDF (FNAL)
Год пуска	1972	1976	1979	1980	1981	1984
Индукция в центре, Тл	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Внутренний диаметр обмотки, м	1,494	1,38	1,66	2,168	~2,0	2,965
Внешний диаметр, м	1,614/1,734	—	1,68	—	—	—
Высота (длина), м	0,9	1,8	3,42	3,3	~3,2	4,794
Номинальный ток, кА	1,26	2,17	3,3	2,27	—	5,0
Запасенная энергия, МДж	4,05	3,0	7,0	11,0	9,4	31
Плотность тока в в проводнике, $A \cdot mm^{-2}$	47,5	40,7	141	700	—	64
Радиационная толщина	4,0	~1,1	~0,5	~0,38	0,7	0,83
Проводник: размер сечения, мм	7,6 × 3,5	6 × 9	1,6 × 2,2 9 × 2,2	3,6 × 0,9	—	Al 20 × 3,89 Cu 3,65 × 3,89
Материалы матрицы	Cu	Cu, Al	Cu, Al, припой	Cu	—	Cu, Al
Отношение сечений N/Sc (N — норм.; Sc — свехпр.)	17,3/1	—	12/1	1,8/1	—	Al/Cu/NbTi 21/1/1
Диаметр жилы, мкм	100	—	—	26	—	50
Количество жил	210	—	—	2200	—	1700
Литература	[3–5]	[5–7, 10]	[5, 8, 9]	[5, 8, 10]	[8]	[8, 12, 13]

ния высокой чистоты. Вакуумный кожух и стенки гелиевого сосуда изготовлены из алюминиевого сплава. Благодаря этому радиационная толщина, по сравнению с магнитом «Pluto», уменьшена в 3,6 раз, несмотря на почти одинаковую плотность тока в проводнике.

2.3. Магнит CELLO. На ускорителе PETRA в ФРГ установлен спектрометр на 4π -геометрии для электрон-позитронных взаимодействий CELLO [5, 8, 9]. Магнит спектрометра состоит из основного центрального соленоида (табл. 2), двух компенсирующих катушек и 100-т железного экрана, действующего как фильтр адронов. Вокруг экрана расположены проволочные камеры для регистрации легких частиц, в зазоре между экраном и основным соленоидом помещен аргонный калориметр. Для обмотки применен внутренне-нестабилизованный проводник с алюминиевой матрицей, который способен работать при плотности тока $141 \text{ А} \cdot \text{мм}^{-2}$. Из алюминиевых сплавов изготовлены опорный цилиндр обмотки и части криостата. Достигнуто дальнейшее, по сравнению с магнитом ISR, уменьшение радиационной длины до 0,5. Гелий циркулирует по навитой на обмотку трубке, т. е. использован метод косвенного криостатирования. Применение этого метода позволяет отказаться от сложного гелиевого сосуда с толстыми стенками и большим количеством жидкого гелия. При этом упрощается решение проблем безопасности в случае перехода магнита в нормальное состояние или аварийном ухудшении изоляционного вакуума.

2.4. Магнит ТРС. Радикальные конструктивные решения, позволившие повысить плотность тока в проводнике до $\sim 700 \text{ А} \cdot \text{мм}^{-2}$ и тем самым уменьшить радиационную толщину обмотки, предложены и осуществлены в магнитах LBL (США) [5, 8, 10].

Рис. 2. Сечение обмотки магнита ТРС [10, 11]: 1 — сверхпроводящий провод; 2 — обечайка из алюминия; 3 — алюминиевый змеевик с жидким гелием; 4 — эпоксидная пропитка; 5 — пропитанная эпоксидом стеклоткань; 6 — проволока $\varnothing 3 \text{ мм}$ из сверхчистого алюминия; 7 — проставки из лески



Магнит ТРС (табл. 2, рис. 2) имеет следующие особенности:

— большая запасенная энергия — более 3,0 МДж на метр длины соленоида, поэтому обмотка нуждается в специальных мерах по защите от перегрева и пробоев электрической изоляции при аварийном переходе магнита в нормальное состояние;

— обмотка навита на опорную трубу из алюминиевого сплава; труба выполнена из материала с высокой электропроводностью и малой радиационной толщиной;

— для охлаждения на обмотку навита алюминиевая трубка, по которой циркулирует двухфазный гелий.

Композиция из сверхпроводящего провода 1, обечайки из алюминия 2, алюминиевого змеевика для жидкого гелия 3, стеклоткани 5, проволоки из сверхчистого алюминия 6, проставок 7 пропитана эпоксидом 4 и образует единый блок. Магнит состоит из нескольких блоков.

Соленоид ТРС вполне заслуживает названия «ультратонкий» и в соединении с сотовым исполнением вакуумного кожуха обеспечивает весьма малые радиационные потери детектируемых частиц (радиационная толщина 0,38).

Разработанные в LBL ультратонкие соленоиды могут служить примером использования комплекса средств защиты магнита от перегрева проводника и пробоя электрической изоляции. Для этого применяют алюминиевую трубу с низким омическим сопротивлением, тепловым и индуктивным образом связанную со сверхпроводящей обмоткой. Труба выполняет следующие функции:

— позволяет всей обмотке перейти в нормальное состояние за короткое время благодаря передаче тепла от трубы к проводнику;

— воспринимает во время эвакуации значительную часть запасенной энергии;

— служит закороченной вторичной обмоткой, что уменьшает переходные электрические напряжения в обмотке.

В дополнение к алюминиевой обечайке 2 (рис. 2) магнит ТРС содержит 600 витков проволоки 6 из сверхчистого алюминия. Эта обмотка играет ту же роль, что и обечайка 2, в защите магнита.

Однако в 1980 г. при испытаниях магнита ТРС произошла авария, во время которой в обмотке возникла электрическая дуга и выгорела часть обмотки. Причиной считают недостаточную толщину и механическую прочность корпусной электрической изоляции (между обечайкой 2 и обмоткой из алюминия 6), которая была проколота железной стружкой. По-видимому, эта авария заставила разработчиков подобных магнитов относиться с некоторой настороженностью к предложенным в LBL методам конструирования обмотки и защиты.

2.5. Магнит CLEO. В Корнельском университете (США) на ускорителе CESER со встречными электронно-позитронными пучками установлен спектрометр CLEO (табл. 2) [8]. По запасенной энергии магнит занимает промежуточное положение между магнитами CELLO и ТРС и имеет умеренную радиационную длину 0,7.

2.6. Магнит CDF. В FNAL создан спектрометр CDF для изучения протон-антипротонных взаимодействий при высоких энергиях в центре масс (рис. 3) [8, 12, 13]. Размеры и запасенная энергия (31 МДж) магнита CDF

Рис. 3. Установка CDF [13]: 1 — трубопроводы для жидкого гелия и электропитания; 2 — РМ трубы; 3 — концевой адронный калориметр; 4 — концевая электроника; 5 — центральная трековая камера; 6 — промежуточная трековая камера; 7 — концевой ливневый калориметр; 8 — концевой адронный калориметр; 9 — криостат с магнитом; 10 — центральный ливневый калориметр; 11 — разгрузочное ребро; 12 — центральный адронный калориметр; 13 — 100-т тележка

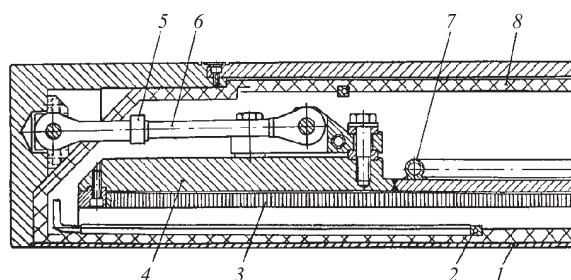
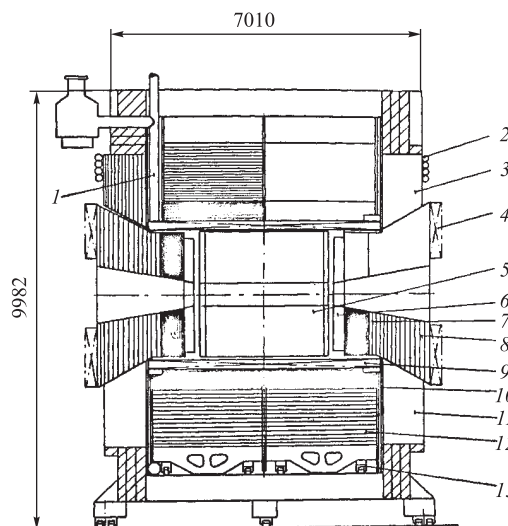


Рис. 4. Сечение обмотки магнита CDF [13]: 1 — вакуумный кожух; 2 — азотный экран; 3 — сверхпроводящая обмотка; 4 — алюминиевая бандажная обечайка; 5 — контакт с жидким азотом; 6 — осевая тяга; 7 — трубка с жидким гелием; 8 — многослойная изоляция

значительно больше, чем у рассмотренных выше магнитов. Параметры магнита CDF представлены в табл. 2, сечение обмотки показано на рис. 4. Характерно, как и для магнитов ISR, TPC, широкое использование алюминия в конструкции криостата, алюминия высокой чистоты для стабилизации и защиты сверхпроводника и применение метода косвенного криостатирования. Особенностью магнита CDF являются размещение обмотки внутри опорного цилиндра, что исключает необходимость в бандаже, уменьшает количество материала и упрощает конструкцию. Однако радиационная толщина магнита не является рекордной и равна 0,83.

Система криостатирования магнита базируется на сателлитном рефрижераторе, созданном для теватрона в FNAL. Расчетный теплоприток к жидкому гелию равен 40 Вт (плюс 14 л жидкого гелия в час для охлаждения тоководов) в стационарном состоянии. В период ввода тока в магнит в результате действия вихревых токов возникает дополнительная тепловая нагрузка в 100 Вт. Гелий подают в змеевик магнита из 2000-л емкости. Время охлаждения от 300 до 80 К — шесть сут, от 80 до 4,2 К — двое сут. При переходе в нормальное состояние с эвакуацией энергии во внешний резистор температура обмотки магнита достигает 50–80 К. Возвращение магнита в рабочее состояние требует 4–6 ч.

Таблица 3. Стоимость сверхпроводящей магнитной системы CDF (тыс. долл.)

Материалы (NbTi, Cu, Al и др.)	140
Изготовление (трехкратная стоимость материала)	420
Электропитание и защита	50
Криогеника	45
Монтаж	100
Итого:	755
<i>Примечание.</i> Стоимость сверхпроводника отдельно (15 км).	100

Электрическая защита предусматривает два режима вывода энергии из магнита: медленный, с малыми вихревыми токами и без перехода обмотки в нормальное состояние, и быстрый. Последний способ используется при переходе проводника в нормальное состояние или при появлении других опасностей, которые могут привести к поломке магнита. Приведем в качестве примера структуру капитальных затрат на изготовление магнита (табл. 3).

2.7. Магниты TOPAZ, VENUS, AMY. Для использования в КЕК (Япония) на ускорителе TRISTAN изготовлены спектрометры TOPAZ, VENUS, AMY. Первые два снабжены тонкими соленоидами с радиационными толщинами 0,7 и 0,52 соответственно (табл. 4) [14].

На рис. 5 представлен разрез соленоида TOPAZ [15]. Магнит TOPAZ близок по размерам и ряду параметров к магниту CDF (табл. 2). Различается конструкция опор холодных масс — длинные тяги в магните CDF и короткие цилиндры из стеклотекстолита с шаровыми металлическими головками магнита TOPAZ (рис. 4 и 5).

Соленоид AMY (табл. 4 [14]) значительно отличается от соленоидов, представленных в табл. 2 и 4. Поскольку требовалась повышенная напряженность поля при обеспечении надежности работы, выбрана криостатическая стабилизация с режимом пузырькового кипения гелия. Обмотка содержит восемь слоев проводника сложной конструкции: семь ниобий-титановых проводов свиты в плоский кабель, который уложен вместе с алюминиевой шиной в

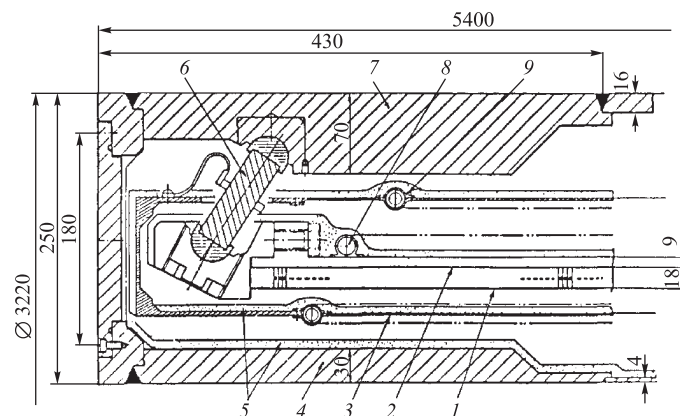


Рис. 5. Продольный разрез края соленоида TOPAZ: 1 — обмотка; 2 — наружный опорный цилиндр; 3 — азотный тепловой экран; 4 — внутренняя обечайка вакуумного кожуха; 5 — многослойная изоляция; 6 — опора холодных частей; 7 — наружная обечайка вакуумного кожуха; 8 — трубка для жидкого гелия; 9 — трубка для жидкого азота

кювету из нагартованной меди и спаян с ними. Медная кювета является достаточной механической опорой, и обмотка не требует банджа. Между слоями обмотки размещены полосы пластика, позволяющие гелию омывать 50–80 % поверхности проводника. Радиационная толщина соленоида АМУ равна 10.

2.8. Магниты ALEPH и DELPHI. Неуклонная тенденция к увеличению размеров и сложности спектрометров привела к созданию соленоидов ALEPH и DELPHI (табл. 4). Эти соленоиды являются крупнейшими из находящихся в настоящее время в эксплуатации сверхпроводящих магнитов. Однако они не превосходили по запасенной энергии соленоиды для водородных пузырьковых камер BEBC и FNAL (табл. 1). ALEPH и DELPHI различаются между собой способом обеспечения циркуляции гелия — термосифон и прокачка соответственно [16, 17]. Другое название термосифонного способа — газовый лифт; гелий циркулирует по замкнутому контуру за счет разницы плотностей в столбах жидкого и парожидкостного гелия. Для осуществления этого способа сосуд с жидким гелием размещается над обмоткой. Жидкость из сосуда подается в нижнюю часть змеевика и возвращается в виде парожидкостной смеси по трубке, соединенной с верхней частью сосуда. Термосифонный способ более экономичен, и, возможно, поэтому тепловыделение на уровне 4,5 К составляет в соленоиде ALEPH 52 Вт, по сравнению с 150 Вт в соленоиде DELPHI. По сравнению с соленоидами таких же размеров соленоид ALEPH обладает более высокой однородностью магнитного поля ($\sim 10^{-4}$) в объеме $\varnothing 3,6 \times 4,4$ м.

Таблица 4. Параметры сверхпроводящих соленоидов для спектрометров на встречных пучках (1984–2005 гг.)

Параметр	TOPAZ	VENUS	AMY	ALEPH	DELPHI	CLEO II	ZEUS	CMS	ATLAS
Размещение	KEK TRISTAN	KEK TRISTAN	KEK TRISTAN	CERN LEP	CERN LEP	CORNEL CESR	DESY HERA	CERN	CERN
Год пуска	1984	1985	1986	1987	1988	1988	1989	2005	2005
Внутренний диаметр обмотки, м	2,9	3,54	2,386	5,52	5,55	3,05	1,848	~ 6, 3	2,44
Длина обмотки, м	5,1	5,27	1,54	6,35	6,8	3,48	2,5	13	5,3
Поле в центре, Тл	1,2	0,75	3,0	1,5	1,2	1,5	1,8	4,0	2,0
Рабочий ток, кА	3,65	4,0	5,0	5,0	5,0	3,3	5,0	20	7,6
Плотность тока в проводнике, А · мм ⁻²	56	60	42,5	40	46	41	77,5	14,5	59
Запасенная энергия, МДж	19,5	12	40	137	108	25	10,5	2520	38,2
Способ охлаждения	Косвенный, прокатка	Косвенный, прокатка	Погружной	Косвенный, термосифон	Косвенный, прокатка	Косвенный, термосифон	Косвенный	Погружной	Косвенный
Хол. масса при 4,5 К, т	4,5	4,3	17	25	25	7,0	—	260	5,7
Теплоприток при 4,5 К, Вт	< 25(+20 л/ч)	—	100(+25 л/ч)	52(+20 л/ч)	150(+36 л/ч)	—	6(+20 л/ч)	900	100
Мощность рефрижератора, Вт	300	—	300	300	400	—	—	—	—
Особенности конструкции	Внешний опорный цилиндр								
Радиационная толщина	0,7	0,52	10	2	4	Толстая	0,9	Толстая	~ 1, 1
Масса магнита, т	10	—	—	60	87	—	—	500 без ярма	5,7
Проводник: размер сечения, мм	18×3,6	10×6,6	12×9,8	35×3,6	24×4,5	16×5	15×(4,3÷5,56)	62×22,3	30×4,25
отношение сечений NbTi/Cu/Al	1/1/20	1/1,27/20,9	1/15,6/1,85	1/1,35/34,2	1/1,2/31,8	1/1,5/45	1/1,1/(14÷18)	1/1,33/28,08 + балдаж	1/0,9/15,6
Литература	[14, 15]	[14]	[14]	[14, 16]	[14, 17]	[14]	[18, 19]	[20]	[21, 48]

2.9. Магнит CLEO II. Соленоид CLEO II (табл. 4) [14] обладает самозащитой за счет использования вторичной обмотки, которая обеспечивает ускоренный переход основной обмотки в нормальное состояние. Обмотка состоит из двух слоев, причем для улучшения однородности магнитного поля плотность тока в краевых секциях увеличена на 4 % за счет уменьшения толщины проводника от 5,1 до 4,9 мм. Однородность составляет $\pm 0,1\%$ в объеме центральной дрейфовой камеры диаметром 2 м и длиной 2 м.

2.10. Магнит ZEUS [18, 19]. Конструкция магнита типична для тонких соленоидов. По сравнению с подобными магнитами соленоид ZEUS имеет меньшие размеры и более высокую плотность тока в проводнике.

2.11. Магнит CMS. Спектрометр CMS (рис. 6) предназначен для идентификации и прецизионных измерений мюонов, фотонов и электронов при протон-протонном взаимодействии на коллайдере LHC в CERN. Для этого необходима высокая напряженность магнитного поля в большом объеме.

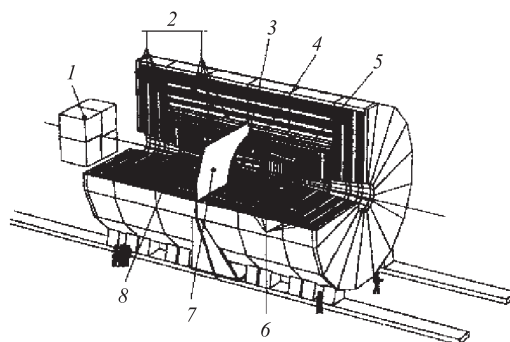


Рис. 6. Общий вид спектрометра CMS: 1 — передний калориметр; 2 — мюонная камера; 3 — внутренний трекер; 4 — электромагнитный кристаллический калориметр; 5 — адронный калориметр; 6 — магнитопровод; 7 — центральная опорная плита; 8 — сверхпроводящая обмотка

Параметры соленоида даны в табл. 4, сечение обмотки показано на рис. 7 [20]. Рекордные длина (13 м) и апертура (5,9 м) соленоида, а также однородное магнитное поле 4 Тл позволяют обходиться одним магнитом в спектрометре, в отличие от, например, спектрометра ATLAS. Обратный магнитный поток заключен в насыщенное ярмо толщиной 1,8 м, ярмо разделено на слои, между которыми размещены мюонные камеры. Общие размеры спектрометра CMS следующие: длина 22 м, диаметр 14 м, масса 12 000 т.

Центральная часть магнитопровода служит опорой для соленоида. Остальные части могут двигаться по общим рельсам вдоль основного пучка.

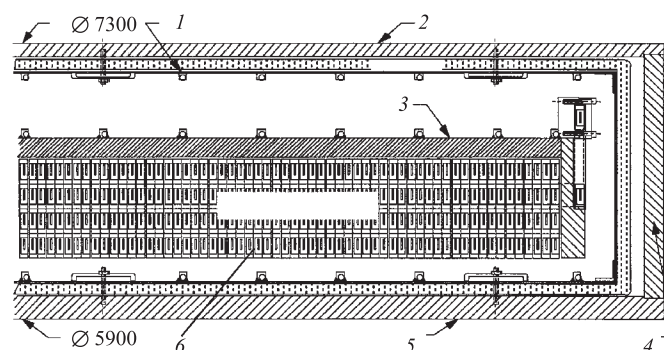


Рис. 7. Продольный разрез соленоида CMS [20]: 1 — многослойная теплоизоляция; 2 — 30-мм нержавеющий вакуумный кожух; 3 — 50-мм внешний экран; 4 — нержавеющий фланец; 5 — 60-мм обечайка вакуумного кожуха; 6 — 4-слойная сверхпроводящая обмотка

Внешний диаметр соленоида выбран, исходя из возможности транспортировки секции в CERN (внешние диаметры обмотки и криостата соответственно равны 6,8 и 7,3 м, диаметр апертуры 5,9 м).

Значительное увеличение таких параметров, как электромагнитные силы, запасенная энергия и ее плотность, связанные с возрастанием напряженности магнитного поля, потребовало использования четырехслойной обмотки и бандажированного проводника. В системе защиты применен эффект перехода из сверхпроводящего в нормальное состояние с обратной связью. Обмотка и опорная обечайка представляют собой токовый трансформатор. При быстром выводе тока из обмотки путем разряда запасенной энергии на внешний резистор в обечайке возникает ток и соответствующие джоулевы тепловыделения. Это приводит к нагреву обечайки, связанной с ней обмотки и ее переходу в нормальное состояние за несколько секунд.

Расчетное время охлаждения составляет примерно один месяц, и в случае перехода в нормальное состояние на повторное охлаждение потребуется 10 сут.

2.12. Соленоид ATLAS [21]. Конструкция соленоида является обычной для радиационно-прозрачных магнитов. Радиационная толщина сравнительно невелика и равна 1,1. Особенностью соленоида является использование наряду с активной электрической защитой деталей конструкции обмотки, которые обеспечивают пассивную защиту от порчи обмотки в случае отказа устройств активной защиты. Для аварийной эвакуации энергии из соленоида ток замыкается на гасительное омическое сопротивление. Если это не про-

исходит по какой-либо причине, нормальная зона в обмотке ускоренно распространяется с помощью полос из алюминия высокой чистоты, наклеенных на поверхность обмотки вдоль ее оси. Такое решение ранее использовано в соленоиде ASTROMAG (разд. 6). Соотношение запасенной энергии и массы обмотки подобрано так, чтобы ее нагрев не превысил 120 К. Такой способ, сочетающий активную и пассивную защиту, обеспечивает высокую надежность магнита в условиях длительной эксплуатации на ускорителе LHC.

Сделаем некоторые выводы.

1. Задача детектирования частиц высоких энергий в месте встречи пучков предъявила к сверхпроводящим соленоидам, наряду с обычными (большой объем и сравнительно низкая индукция магнитного поля, высокая надежность), и специфическое требование — малые радиационные потери частиц при прохождении через стенки соленоида.

2. Начиная с 1972 г. (магнит «Pluto») создан ряд сверхпроводящих магнитов, в достаточной степени отвечающих перечисленным требованиям, накоплен значительный опыт конструирования и эксплуатации этих магнитов.

3. Отличительными чертами рассматриваемых магнитов являются:

- косвенное криостатирование обмотки с циркуляцией гелия по змеевику;
- применение алюминия для изготовления криостата и стабилизации сверхпроводника;
- внешнее, по отношению к обмотке, расположение опорной обечайки;
- использование в некоторых случаях специальных мер защиты обмотки.

3. ДИПОЛЬНЫЕ МАГНИТЫ

Магнитное поле, направление которого перпендикулярно траектории частиц, можно создать с помощью дипольного магнита, который может иметь различные формы обмоток. Ниже описаны дипольные магниты различных конструкций.

3.1. Магниты с разделенными цилиндрическими обмотками. *Магнит «Omega».* Разработанный М. Морпурго магнит «Omega» содержит цилиндрические катушки, расположенные в железном магнитопроводе (рис. 8. и табл. 5) [22, 23]. Обмотки выполнены из полого сверхпроводника, по которому циркулирует сверхкритический гелий. Сила притяжения между обмоткой и магнитопроводом составляет 2000 т и воспринимается 72 титановыми распорками (на каждой обмотке). Теплоприток в жидкий гелий по распоркам велик и составляет 180 Вт.

Циркуляционное криостатирование полых проводников использовано М. Морпурго и в трех других магнитах, конфигурация которых схожа с

«Omega», но размеры несколько меньше. Два магнита «Vertex» имеют распорки из стеклотекстолита с промежуточным охлаждением [23]. Обмотки упомянутых магнитов имеют полную криостатическую стабилизацию.

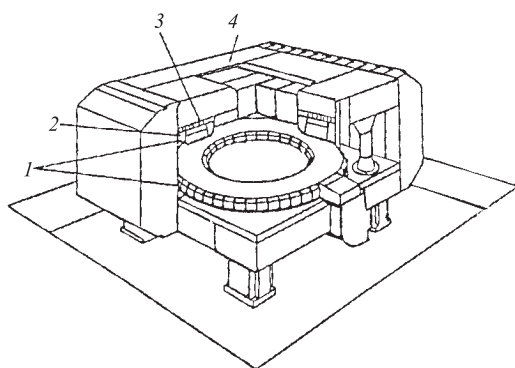


Рис. 8. Общий вид дипольного магнита «Omega» [23]: 1 — вакуумные кожухи; 2 — сверхпроводящие обмотки; 3 — опоры обмоток; 4 — магнитопровод

Недостатком магнитов с разделенными плоскими обмотками является удаленность обмотки от рабочего объема, что приводит к повышенному расходу сверхпроводника.

Магнит на основе ярма циклотрона FNAL [23]. Этот магнит по многим параметрам (табл. 5) является хорошим образцом дипольного магнита для спектрометра. Расстояние между полюсами магнита (1,3 м) меньше, чем у «Omega» (2 м), но диаметр полюсов (4,3 м) больше (3 м). Его отличает от «Omega» более совершенная теплоизоляция.

В магните использовано ярмо старого чикагского циклотрона. Разработчики сверхпроводящих обмоток ставили перед собой цель создать простую конструкцию с низкими тепловыми потерями. Поэтому выбран небольшой рабочий ток (1 кА) и высокая плотность тока в обмотке — $60 \text{ А} \cdot \text{мм}^{-2}$, что почти в пять раз выше, чем в «Omega». Обмотка имеет частичную криостатическую стабилизацию. Обмотки связаны с магнитопроводом с помощью телескопических опор, имеющих низкую теплопроводность. Измеренный теплоприток в область 4,5 К во много раз ниже, чем для магнитов таких размеров, и составляет примерно 9 Вт.

3.2. Циркуляционный магнит с цилиндрическими седлообразными обмотками. Магнит создан М. Морпурго несколько позже [24], чем «Omega», имеет другую конфигурацию обмотки (рис. 9 и табл. 5) и тот же тип криостатической стабилизации путем прокачки гелия через полый проводник. Здесь седлообразные обмотки 3 укреплены в бандаже 1, а внутренние обечайки 2 изготовлены из нержавеющей стали. Вакуумный кожух 4 имеет цилиндрическую форму и помещен в цилиндрическое отверстие магнитопровода. Обмотка выполнена

Таблица 5. Параметры сверхпроводящих дипольных магнитов

Параметры	Анализир. 4 магн.	«Omega»	Диполь Морпурго	Диполь на ярме шкл.	«Benkei»	SKS	HMS	HRS	ALICE	ALICE
Размещение	FNAL	CERN	CERN	FNAL	KEK	KEK	SEBAF	SEBAF	CERN	CERN
Изготовитель	FNAL			FNAL	KEK	Токий- ский ун-т	ELIN		Эскиз. проект ОИЯИ	Франция (обмотка); ОИЯИ (ярмо); CERN (сборка)
Год пуска	до 1972	1972	1978	~ 1980	1981	1991	1994		—	2004
Зазор между полюсами, м		2,0	—	1,3	1,0	0,5	0,42	0,25	5,0	
Апертура, м	0,6×0,86		∅1,6	—		Рис.13	0,6×0,4	0,25×1,0	∅3,8	∅4,078
Внутр. размеры обмотки, м		∅3,58	∅1,9	∅5,2	Шир. 1,53	Сектор. Рис.13		1,0	∅4,2	∅4,078
Длина обмотки, м		2×0,24	<3	2×0,12	1,59	~ 2,5	5,26 эфф.	6,6 эфф.	4,6	5,0
Поле в центре, Тл	1,8–2,0	1,8	1,9	1,5	2,0	3,0	1,66	1,6	1,0	0,67
Рабочий ток, кА	0,2	5,0	6,0	1,0	0,61	0,5	1,9–3,0	1,8	5,0	6,42
Плотность тока в обмотке, А · мм ⁻²		12,6	18	60	56	58	32–50		66	2,33
Запасенная энергия, МДж	0,3–2,0	50	20	32,5	3,15	11,2	3,0–9,9	3,5	27	—
Способ охлаждения	Погруж.	Сверхкрит. гелий циркул.	Циркул.	Погруж.	Погруж.	Погруж.	Термосифон погруж.	Погруж.	Термосифон косвенный	Циркул. воды
Хол. масса при 4,5 К, т		50	40		5,64	4,5	50		50	—
Теплоприток при 4,5 К, Вт	8,5	300		9,2	7,5	3,0	22		8(+0,5 т/с)	—
Особенности конструкции	Седлообр. прямоуг. обмотка	Плоские цилинд. обмотки	Седлообр. цилинд. обмотка	Плоские цилинд. обмотки	Седлообр. прямоуг. обмотка	Плоские обмотки	Плоские обмотки	Плоские обмотки	Седлообр. цилинд. обмотка	Седлообр. цилинд. обмотка
Масса магнита, т	65–165	1400	230	>2000	16,3 без Fe	280	470	460	750	835
Проводник: размер, мм ² отношение NbTi/Cu/Al	∅2,0	18×18 отв.9×9	18×18 ∅10		2,3×2,3 3,3×1,8 1,8	3,5×1,9 3,3×1,8 1/10	14×4		20×3,6 1/1,28/21	50×50 отв. ∅29
Литература	[23, 25, 26]	[22, 23]	[24]	[23]	[27]	[28–31]	[32–34]	[35]	[37, 38]	[41]

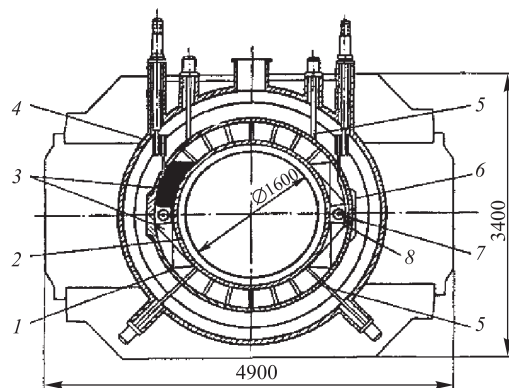


Рис. 9. Дипольный магнит с седлообразной цилиндрической обмоткой [24]: 1 — бандажные полуцилиндры; 2 — внутренняя обечайка; 3 — обмотки; 4 — наружная обечайка вакуумного кожуха; 5 — подвеска; 6 — стяжные болты; 7 — титановые тяги; 8 — подвеска

из полого композитного проводника, через который с помощью холодного поршневого насоса циркулирует двухфазный гелий. Преимущества охлаждения двухфазным гелием состоят в высоком коэффициенте теплоотдачи, большой теплоемкости криоагента при постоянстве его температуры. Проводник состоит из медной трубы с намотанными на нее спирально многожильными ниобий-титановыми проводами и медных наружных обкладок. Композиция соединена оловянно-серебряным припоем. Каждая половинка обмотки, зафиксированная в форме, пропитана под вакуумом эпоксидной смолой. Двухфазный гелий (расход 150 г/с) пропускают через 20 параллельных каналов, на которые разделена обмотка магнита. Скорость движения гелия в проводнике $\sim 0,75$ м/с. Экспериментально доказано, что при меньшей скорости возникает серьезная проблема разделения парожидкостной смеси на жидкость и пар во включенных параллельно секциях обмотки магнита. Вследствие этого возможен переход участка проводника в нормальное состояние и последующий переход всего магнита. Подобное явление возникало в первых экспериментах с периодом в несколько часов.

3.3. Магниты с седлообразными прямоугольными обмотками. *Магниты FNAL* [23, 25, 26]. В начале 70-х годов в FNAL изготовлены анализирующие дипольные магниты. Размеры и основные параметры магнитов представлены в табл. 5, рис. 10 и 11. Обмотки из многожильного провода $\varnothing 2$ мм погружены в жидкий гелий, запас которого в разных магнитах составляет от 500 до 600 л. Расход гелия равен 36–50 л/сут. Гелиевый сосуд 1 (рис. 10) имеет плоские стенки из листов нержавеющей стали. Обмотка крепится к стенке сосуда с помощью стержней 3. Слои обмотки отделяются друг от друга стеклотекстолитовыми прокладками.

Магнит «Benkei» [27]. Магнит «Benkei» (табл. 5, рис. 12) может служить примером удачной переделки обычного «теплого» магнита в сверхпроводящий. В результате увеличены напряженность магнитного поля в центре

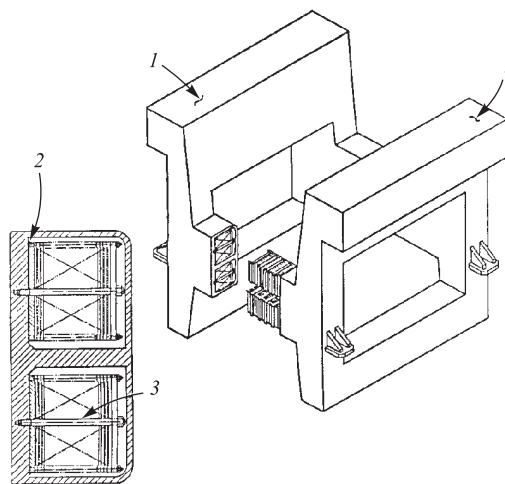


Рис. 10. Гелиевый криостат и обмотки дипольных магнитов FNAL [25]: 1 — емкость для жидкого гелия; 2 — сварной шов; 3 — монтажный стержень с изолирующей трубкой

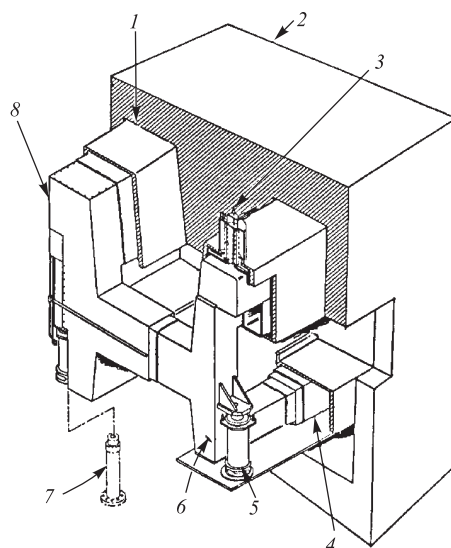


Рис. 11. Дипольный магнит FNAL в сборке [25]: 1 — вакуумный кожух; 2 — магнитопровод; 3 — тепловой экран (80 К); 4 — токовводы; 5 — транспортировочная опора; 6 — гелиевый сосуд; 7 — опора; 8 — многослойная тепловая изоляция

(с 1,7 до 2 Тл) и зазор между полюсами (с 0,5 до 1 м), снижены затраты на энергопитание (с 2 МВт до 10 кВт).

Магнит имеет существенные отличия от магнитов FNAL в технике изготовления обмоток и некоторых других узлов. Технология изготовления обмотки имеет следующие особенности. Шинку навивают в плоские катушки, которые вулканизируют, затем на прессе отгибают лобовые части. 20 катушек,

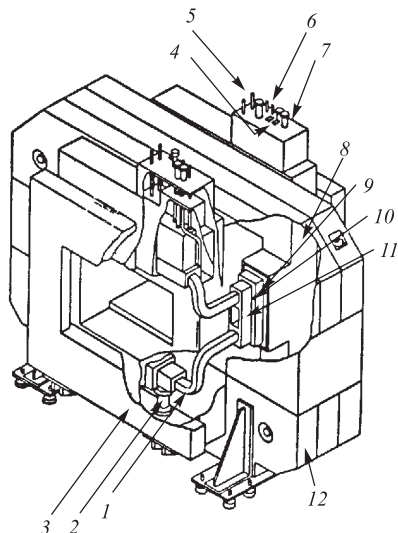


Рис. 12. Дипольный магнит «Benkei» [27]: 1 — обмотка; 2 — опорные колонны; 3 — защитная рама; 4 — токовводы; 5 — ввод жидкого азота; 6 — ввод жидкого гелия; 7 — узел вводов; 8 — вакуумный кожух; 9 — тепловой экран; 10 — многослойная изоляция; 11 — гелиевый сосуд; 12 — магнитопровод

разделенных изоляционными проставками, стягивают стальными хомутами в одну обмотку. Авторы [27] считают данную технологию весьма экономичной. Электромагнитные силы воспринимаются стенками гелиевого сосуда толщиной 35 мм. Криостат опирается на телескопические колонны, трубы которых изготовлены из стеклотекстолита. Растяжки из титанового сплава воспринимают действующие на криостат нескомпенсированные магнитные силы.

3.4. Магниты с плоскими разделенными обмотками. *Магнит SKS* [28–31]. Магнит входит в состав каонного спектрометра, установленного на синхротроне КЕК. Планировалось изучение гиперядер пионов с помощью подобных спектрометров. Особенностью магнитной системы является возможность ее передвижения вокруг мишени при рабочем состоянии магнита. Для этого магнит соединен с рефрижератором гибкими криогенными трубопроводами, а магнитопровод снабжен опорами на воздушной подушке. Магнит с H-образным ярмом 1 (табл. 5 и рис. 13 [28]) выбран вместо магнита типа «оконная рама», так как это делает более легким изготовление обмоток 4. Каждая обмотка расположена в гелиевом сосуде 2, стенки которого рассчитаны на восприятие электромагнитных сил, действующих на обмотки. Максимальное рассеянное поле на поверхности магнитопровода не должно превышать 500 Гс. Гелиевые сосуды по вертикали механически скреплены стойками, которые воспринимают основную часть вертикальных электромагнитных сил. Действующие на обмотки асимметричные силы воспринимаются опорами 12. В обмотке выполняются условия частичной криостатической стабилизации. Критический ток проводника примерно в три раза выше рабочего. Подвески

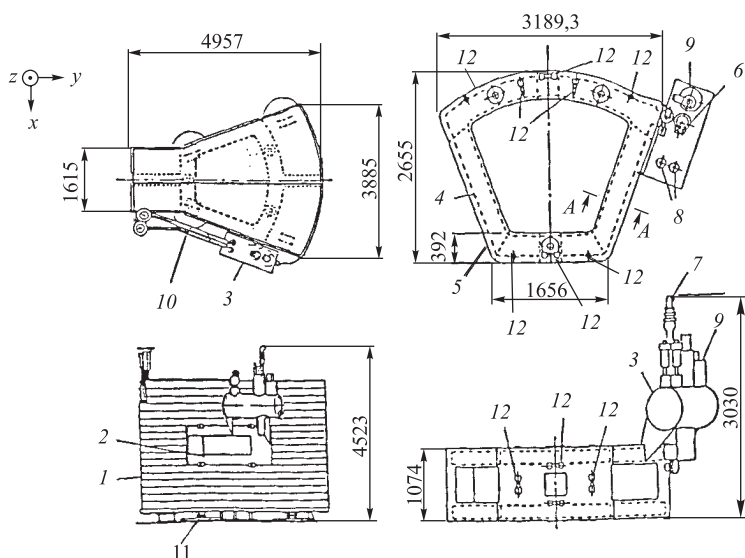


Рис. 13. Дипольный магнит спектрометра SKS [31]: 1 — магнитопровод; 2 — криостат; 3 — гелиевый резервуар; 4 — обмотка; 5 — вакуумный кожух; 6 — токовводы; 7 — предохранительный клапан; 8 — контрольный вентиль; 9 — рефрижератор для теплового экрана; 10 — трубопроводы жидкого гелия; 11 — опоры на воздушной подушке; 12 — опоры

гелиевого сосуда содержат тепловые «якори» при 80 и 20 К. В системе используются два рефрижератора: средних размеров (350 Вт при 4,5 К) и малый, работающий по циклу Джиффорда–МакМагона. Рефрижераторы полностью автоматизированы с помощью компьютера. Во время остановки эксперимента работает непрерывно только малый рефрижератор, что позволяет держать обмотку в холодном состоянии с очень небольшим ростом температуры (за 5 сут до 40 К).

Магниты для HMS- и HRS-спектрометров CEBAF [32–35]. В CEBAF созданы дипольные магниты для спектрометров HMS и HRS. Внешний вид HMS-диполя показан на рис. 14, основные параметры даны в табл. 5 [32–34]. Диполь изогнут по радиусу ~ 12 м, имеет эффективную длину 5,26 м и создает отклонение частиц с энергией 6 ГэВ на угол 25° . Каждая из двух обмоток магнита заключена в собственный гелиевый сосуд, стенки которого воспринимают электромагнитные силы, действующие в плоскости обмотки. Силы взаимодействия между обмотками и ярмом передаются через трубчатые опоры 1 и стенки вакуумного кожуха 7 (рис. 15). Гелиевый сосуд крепится

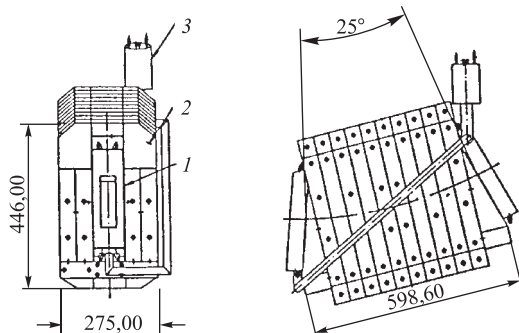


Рис. 14. Дипольный магнит спектрометра HMS [32–34]: 1 — криостат; 2 — магнитопровод; 3 — гелиевый резервуар (размеры в см)

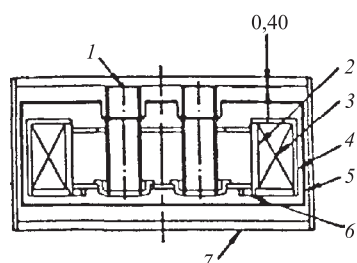


Рис. 15. Поперечное сечение дипольного магнита HMS [32–34]: 1 — трубчатые опоры; 2 — бобина; 3 — обмотка; 4 — скосы; 5 — экран с жидким азотом; 6 — полость с жидким гелием; 7 — вакуумный кожух

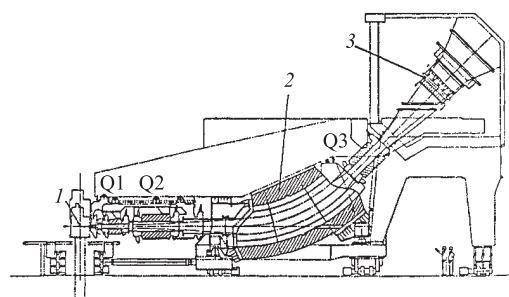


Рис. 16. Общий вид спектрометра HRS [35]: 1 — мишень; 2 — дипольный магнит; 3 — детекторная система; Q1, Q2, Q3 — квадрупольные магниты

внутри вакуумного кожуха 8 растяжками из высокопрочного сплава «Нитрок 60». Радиационный экран 5 представляет собой полую панель, изготовленную из листов нержавеющей стали. Циркуляция азота и гелия осуществляется за счет термосифонного эффекта. Проводник диполя полностью криостатически стабилизирован и представляет собой плоский кабель, вложенный в медную матрицу.

Общий вид HRS-спектрометра и его дипольного магнита показан на рис. 16 и 17, параметры магнита приведены в табл. 5 [35]. Обмотка выполнена из плоского кабеля и имеет частичную криостабилизацию. Магниты HMS и HRS имеют заметное сходство.

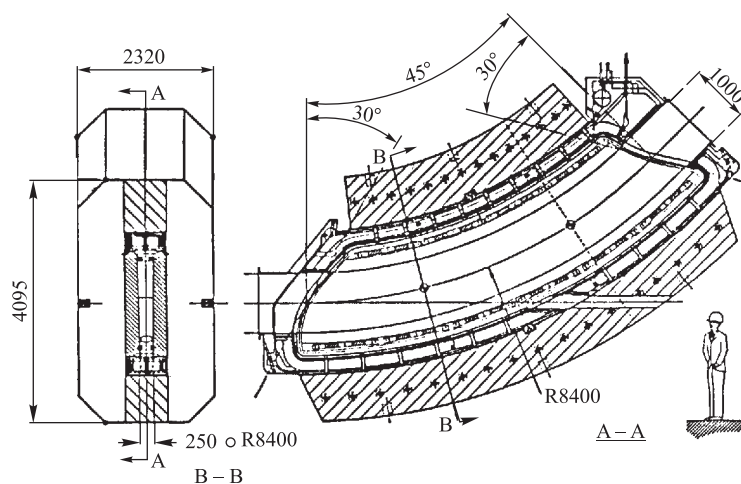


Рис. 17. Дипольный магнит HRS [35]

3.5. Магниты ALICE. *Сверхпроводящий дипольный магнит ALICE (эскизный проект).* В коллаборации ALICE (CERN) для работы на ускорителе LHC в дополнение к основному спектрометру создается так называемое мюонное плечо с крупногабаритным дипольным магнитом. Первоначально планировалось создание сверхпроводящего варианта магнита и разрабатывался его эскизный проект.

Конструкция дипольного магнита ALICE (табл. 5, рис. 18 и 19) [36–38] схематически выглядит следующим образом. Обмотка 5 (рис. 18) из стабилизированного алюминием плоского кабеля имеет седлообразную форму с цилиндрическими лобовыми частями. Опорный цилиндр 4 состоит из двух коаксиальных цилиндрических обечаек, скрепленных кольцевыми ребрами. Обмотка приклеена к внутренней стороне банджа с помощью эпоксидного компаунда.

Охлаждающие трубки соединены с обмоткой фитилями из медных оплеток, к банджу трубки приварены. Гелий поступает в трубки из сосуда 1, циркуляция гелия осуществляется за счет термосифонного эффекта. Магнитопровод 2 состоит из слябов, которые являются наиболее дешевым видом проката.

Таким образом, в описываемой конструкции использованы многие элементы существующих и надежно работающих диполей и соленоидов: форма обмотки; конструкция шины; бандж обмотки в виде внешней трубы; косвенное криостатирование; термосифонный метод циркуляции гелия; опоры для холодной массы и др.

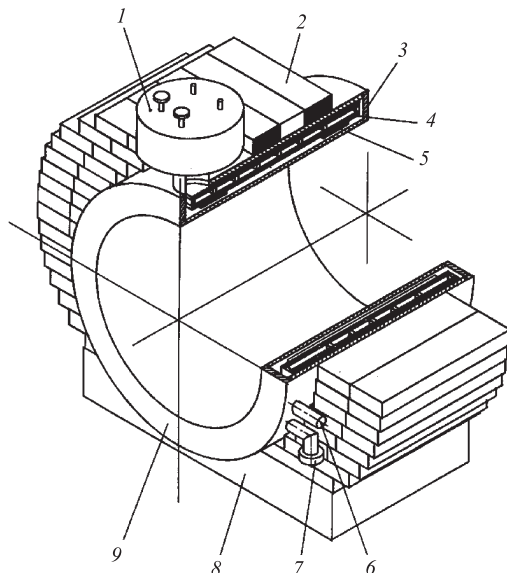


Рис. 18. Сверхпроводящий дипольный магнит ALICE [37]: 1 — гелиевый сосуд; 2 — магнитопровод из слябов; 3 — вакуумный кожух; 4 — опорный цилиндр; 5 — сверхпроводящая обмотка; 6 — токовводы; 7 — трубопровод для вакуумной откачки; 8 — основание; 9 — криостат

По величине рабочего объема ($\sim 50 \text{ м}^3$) магнит ALICE значительно превосходит все дипольные магниты. По запасенной энергии (27 МДж) магнит ALICE не относится к крупнейшим, значительно отстает от диполя «Omega» (50 МДж).

Большие размеры магнита накладывают не только высокие требования к технологии изготовления, с увеличением диаметра апертуры седлообразных магнитов возрастают трудности восприятия электромагнитных сил. Рассмотрим достоинства и недостатки различных форм обмоток в применении к магниту ALICE. В седлообразных обмотках расход сверхпроводника минимален, но опорный бандаж дорог в изготовлении и имеет большую холодную массу. Рассмотрены два способа криостатирования: погружной с полной или частичной криостабилизацией и косвенный. В последнем варианте циркуляция гелия осуществляется либо по полый шине, либо по трубкам, связанным с обмоткой тепловыми мостами. В основе выбора лежат соображения о надежности магнита во время эксплуатации и стоимости его изготовления.

Частичная криостабилизация вполне возможна и успешно применяется в крупных магнитах. Однако конструкция, в которой сочетаются обмотка, гелиевый сосуд и мощный бандаж, оказывается слишком сложной. Кроме того, необходима система для аварийного вывода и сбора гелия.

У способа циркуляции гелия по полному проводнику два основных недостатка: первый — надежность магнита определяется надежностью насосов для прокачки гелия и соответственно она ниже, чем в системах без вынужденной

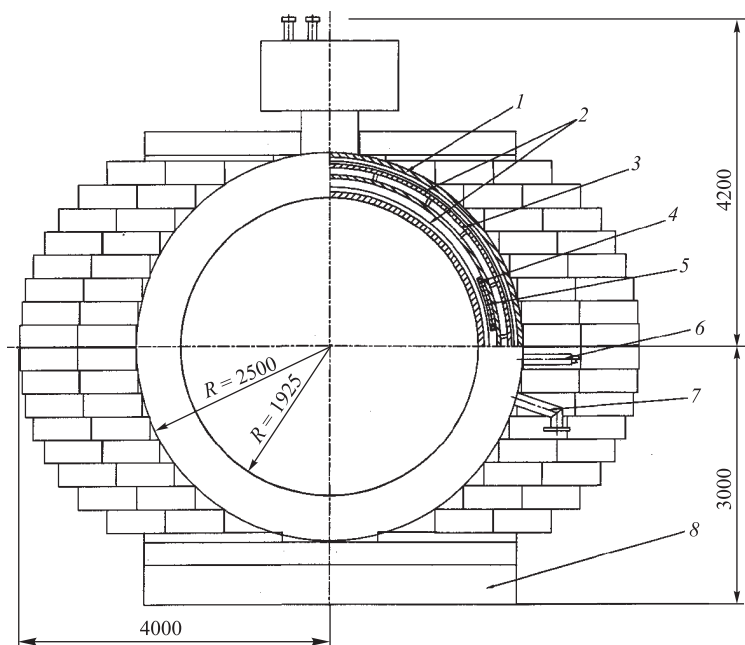


Рис. 19. Сверхпроводящий дипольный магнит ALICE [37] (поперечное сечение): 1 — вакуумный кожух; 2 — радиационный экран; 3 — опорный цилиндр; 4 — гелиевые трубки; 5 — сверхпроводящая обмотка; 6 — токовводы; 7 — трубопровод для вакуумной откачки; 8 — основание

циркуляции; второй — повышенные энергопотери в жидком гелии, связанные с высокими скоростями гелия в проводнике и большим гидравлическим сопротивлением.

Наиболее привлекательной является косвенная система криостатирования стабилизированного алюминием высокой чистоты сверхпроводника, которая получила широкое распространение в радиационно-прозрачных соленоидах. В сочетании с термосифонной циркуляцией такая система является весьма надежной, сравнительно дешевой и экономичной.

Таким образом, рассматриваемый магнит ALICE превосходит по размерам все предназначенные для спектрометров дипольные магниты и близок в этом отношении к крупнейшим соленоидам для встречных пучков. По запасенной энергии он относится к числу средних магнитов. Большие размеры магнита ALICE приводят к значительным трудностям в обеспечении минимальных деформаций обмотки. Косвенное криостатирование с термосифонной циркуляцией, стабилизация сверхпроводника чистым алюминием нашли

широкое применение в мировой практике и могут использоваться для дипольного магнита.

Однако в 1996 г. коллаборация приняла решение об изготовлении теплого магнита вместо сверхпроводящего.

Теплый дипольный магнит ALICE. Наряду со сверхпроводящими магнитами в физических установках продолжают иногда использовать магниты с водяным охлаждением. Проиллюстрируем подобный случай и причины отказа от сверхпроводящего магнита на примере коллаборации ALICE.

При выборе теплого варианта были учтены следующие обстоятельства:

- существенно более низкие капитальные затраты;
- приемлемый для CERN уровень затрат на энергопитание магнита;
- наличие готовых источника питания и станции водяного охлаждения.

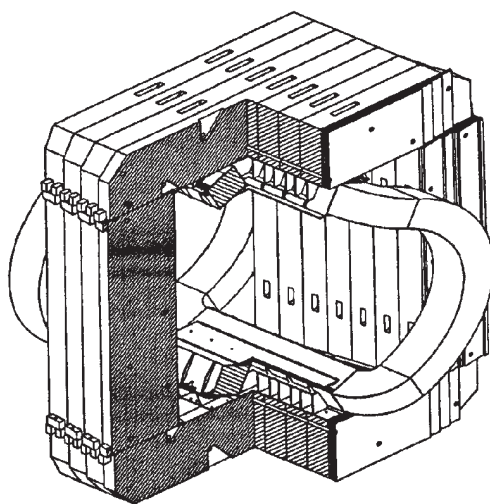


Рис. 20. Теплый дипольный магнит ALICE

для магнитопровода. Однако технология изготовления обмотки значительно сложнее и соответственно дороже, чем при использовании плоских обмоток. Кроме того, напряженно-деформируемое состояние обмотки под действием пондеромоторных сил и нагрева является довольно сложным, и требуется выполнение особых условий закрепления обмотки в магнитопроводе.

Таким образом, при изготовлении магнита пришлось вернуться к почти ушедшей в прошлое технологии.

Предложен [39], разработан [40–42], изготовлен и испытан в 2004 г. вариант с седлообразной обмоткой (табл. 5, рис. 20). Лобовые части обмоток имеют цилиндрическую форму. В этом отношении форма обмоток сохранила преемственность со сверхпроводящим вариантом. Такая обмотка обеспечивает необходимую конфигурацию и параметры магнитного поля при удовлетворительных затратах на алюминиевый трубчатый проводник и сталь

4. ТОРОИДАЛЬНЫЕ МАГНИТЫ

Тороидальные магниты используются в спектрометрах сравнительно редко, хотя создаваемое ими вихревое магнитное поле обеспечивает спектрометрам большие преимущества. Магнитное поле тороида почти везде перпен-

дикулярно траектории частиц, не требуется железных магнитопроводов для обратного магнитного потока.

В экспериментах по физике ядер и частиц нередко основными требованиями к спектрометрам являются высокое импульсное разрешение и большой аксептанс. Тороидальные магниты являются одним из удачных вариантов удовлетворения этих требований.

4.1. Спектрометр КЕК [43, 44]. Для экспериментов с каонами на протонном синхротроне КЕК установлено два многоцелевых спектрометра. В одном из них находится 12-секторный тороидальный магнит, внешний вид которого показан на рис. 21 [43]. Спектрометр способен анализировать заряженные частицы типа пионов в диапазоне импульсов от 100 до 300 МэВ/с в угле 1,5 ср. Величина этого угла в десять раз больше, чем в спектрометрах, использующих дипольные магниты.

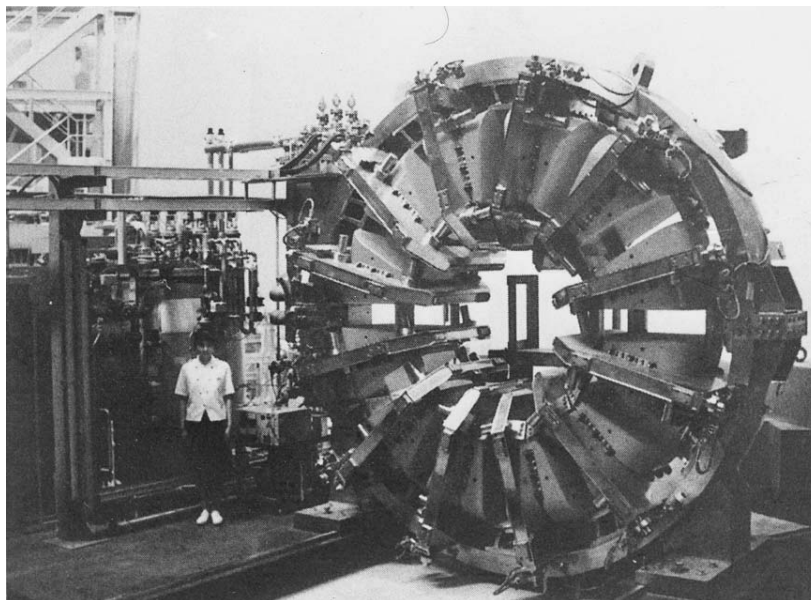


Рис. 21. 12-секторный тороидальный магнит для спектрометра КЕК [43]

Магнит изготовлен в Токийском университете и снабжен построенной в КЕК криогенной системой. Конструкция магнита (табл. 6) выглядит следующим образом: 12 сверхпроводящих катушек с железными сердечниками собраны в кольцевую установку. Тороиды без железных полюсов имеют существенный недостаток, состоящий в ослаблении магнитного поля B с уве-

Таблица 6. Параметры сверхпроводящих тороидальных магнитов

Параметр	Спектрометр	CLAS	STORS	ATLAS End-Cap Toroid	ATLAS Barrel Toroid
Размещение	КЕК	CEBAF	—	CERN	CERN
Изготовитель	Токийский ун-т, КЕК	Oxford Instr.Co	Проект ОИЯИ	Проект RAL	Проект Сакле
Год пуска	1989	1995	—	2005	2005
Внутренний диаметр тороида, м	1,1	—	0,4; 1,08	1,65	9,4
Внешний диаметр тороида, м	3,8	5,4	5,0	10,7	20,1
Длина тороида, м	~1,0	—	3 × 12	5,0	25,3
Число обмоток в магните	12	6	8	8	8
Число витков в обмотке	238	—	70	116	120
Макс. поле в обмотке, Тл	2,5	3,5	3,6; 4,3	4,1	3,9
Рабочий ток, кА	1,55	3,86	10	20	20,5
Плотность тока в обмотке, А · мм ⁻²	133	100	80	—	—
Запасенная энергия, МДж	2,2	18	—	206	1080
Способ охлаждения		Косвенный, прокатка			
Хол. масса при 4,5 К, т	2,7	—	—	160	370
Теплоприток при 4,5 К, Вт	15	57	—	329	990
Мощность рефрижератора, Вт	150 л/ч	—	1400	580	2000
Особенности конструкции	Железные сердечники	Обмотка в форме почки			
Масса магнита, т	38	—	150	239	830
Проводник: размер, мм отношение NbTi/Cu/Al	6,0 × 1,75 1/3,5	—	30 × 4 1/1,3/13	41 × 12 1/1,3/19	57 × 12 1/1,3/28
Литература	[43, 44]	[45, 46]	[47]	[48, 51]	[48, 52]

личением радиуса r , $B \sim 1/r$. Частицы с большим импульсом отклоняются меньше, в результате сужается область импульсов для спектрометра определенных размеров. Описываемый магнит отличается наличием железных полюсов. Зазор между полюсами не зависит от радиуса и поле между ними везде одинаково и равно 1,8 Тл [44]. Каждая катушка размещена в отдельном криостате (рис. 22). Шина из NbTi навита на бобину из нержавеющей стали 2 и пропитана эпоксидным компаундом. Обмотка охлаждается косвенным образом с помощью двухфазного гелия, протекающего по медной трубке 6, и медных пластинок 3. Все катушки соединены последовательно по току и гелию. Тепловой экран 4 охлаждается до 60 К газообразным гелием, идущим из рефрижератора. Косвенное криостатирование и высокая плотность тока позволяют сократить поперечные размеры криостата, что, в свою очередь, обеспечивает большой аксептанс частиц. Каждая обмотка крепится в криостате с помощью изолирующих титановых опор. Все криостаты имеют общую вакуумную систему, по трубкам которой пропущены также шины и охлаждающие трубки. Электрическая защита магнита выполнена по стандартной схеме, в которой по сигналу детектора нормальной зоны при появлении нормальной зоны в любой катушке два ключа отсоединяют источник питания и ток замыкается через гасительное сопротивление 0,6 Ом. Особенность данных обмоток состоит в том, что они переходят в нормальное состояние при уменьшении тока с временной постоянной 5 с под действием энергетических потерь. Температура обмоток возрастает лишь до 30 К (расчетная), что позволяет немедленно начать процесс охлаждения. В менее опасных ситуациях открывается только один ключ, катушки замыкаются на сопротивление 0,03 Ом, ток затухает с постоянной 100 с и нормальная область не инициируется.

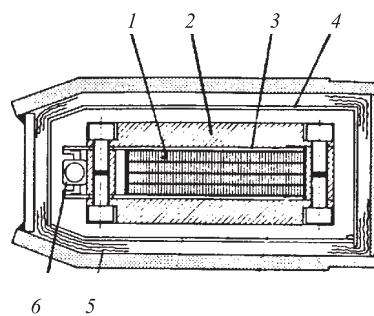


Рис. 22. Сечение обмотки магнита КЕК [44]: 1 — обмотка; 2 — каркас обмотки; 3 — медная пластина; 4 — тепловой экран; 5 — многослойная вакуумная изоляция; 6 — медная трубка для жидкого гелия

Криоагент из магнита удаляется за 3 с через клапаны, установленные на входе и выходе охлаждающей трубки, максимальное давление (расчетное) в трубке не превышает 5 МПа.

4.2. Магнит CLAS [45–46]. Магнит входит в состав спектрометра, предназначенного для исследования ядерных взаимодействий в геометрии 4π на ускорителе CEBAF в США. Схематический внешний вид магнита показан на рис. 23 [45].

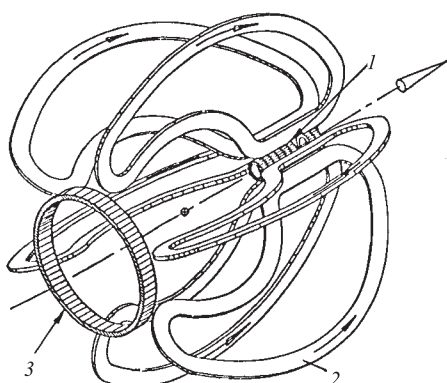


Рис. 23. Изометрический вид обмоток магнита спектрометра CLAS [24]: 1, 3 — опорные кольца; 2 — обмотки в вакуумных кожухах

Основные параметры приведены в табл. 6, конструктивные особенности магнита представлены на рис. 24 [46].

Принципы внутренней стабилизации и косвенного криостатирования проводника применены для достижения минимальных поперечных размеров обмотки и соответственно наиболее полного использования пространства для детектирования частиц. Плоские катушки имеют форму, напоминающую почку. В расширенном межкатушечном пространстве оси пучка, где нет магнитного поля, располагается мишень.

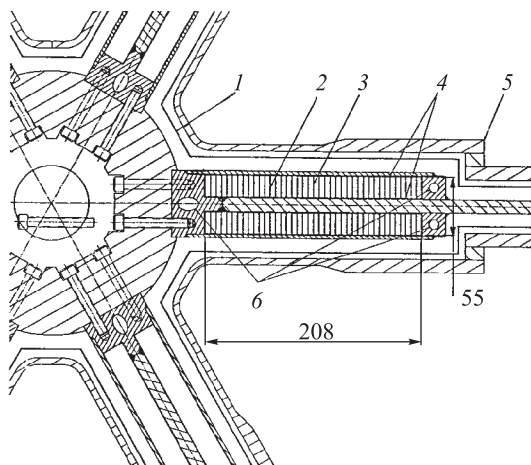


Рис. 24. Сечение центральной части магнита CLAS [26]: 1 — тепловой экран (80 К); 2 — электрическая изоляция; 3 — проводник (10 кА); 4 — прокладки из майлара; 5 — вакуумный кожух; 6 — отверстия для охлаждающего гелия

Разработчики магнита отмечают преимущество концепции и конструктивных решений с принятыми в соленоидах ALEPH, CDF, DELPHI и CLEO II. Отметим особенность изоляции обмотки, состоящую в том, что наряду с корпусной электрической изоляцией на торцах каждой обмотки уложены

по два слоя майлара толщиной 0,125 мм (рис. 24,4). Прокладки служат для предотвращения неупругих проскальзываний обмотки в процессе запитки магнита.

4.3. Магнит СТОРС [47]. В ОИЯИ предложен проект сверхпроводящего тороидального спектрометра СТОРС [47]. Спектрометр предназначен для прецизионных измерений структурных функций в пучках мюонов.

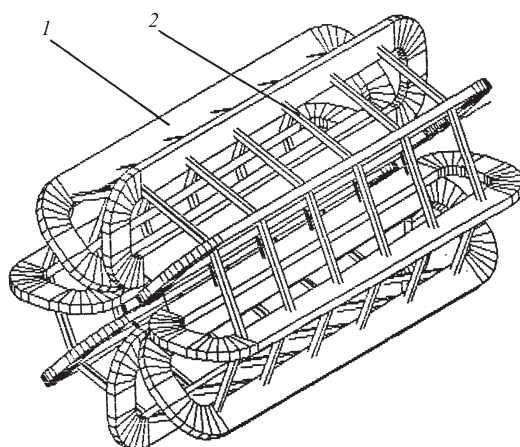


Рис. 25. Передний модуль магнита установки СТОРС [47]: 1 — обмотки в вакуумных кожухах; 2 — силовые тяги

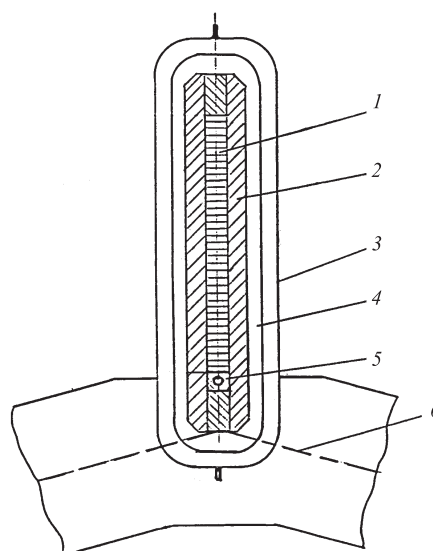


Рис. 26. Поперечное сечение обмотки магнита СТОРС [47]: 1 — обмотка; 2 — силовой каркас; 3 — вакуумный кожух; 4 — тепловой экран; 5 — трубка для жидкого гелия; 6 — силовые тяги в вакуумном кожухе

Проведены эскизное проектирование и расчеты сверхпроводящего тороидального магнита (СПТМ) для СТОРС. Ориентировочные размеры и основные параметры СПТМ представлены в табл. 6, внешний вид — на рис. 25. СПТМ состоит из трех модулей длиной 12 м. Два первых (со стороны входа первичного пучка мюонов) имеют внутреннюю апертуру с радиусом $\sim 0,4$ м, последний $\sim 0,1$ м. Поперечное сечение обмотки показано на рис. 26. Обмотка 1 уложена в каркас 2 из высокопрочного алюминиевого сплава и пропитана эпоксидным компаундом вместе с трубкой 5, через которую прокачивается двухфазный жидкий гелий. Криостат состоит из вакуумного кожуха 3, радиационного экрана 4 и многослойной изоляции. Действующие на обмотку радиальные пондеромоторные силы воспринимаются холодными тягами 6, соединяющими все обмотки модуля в единую жесткую систему.

4.4. Магниты ATLAS. Протонный спектрометр ATLAS — один из основных спектрометров строящегося в CERN коллайдера LHC [48]. Магнитная система состоит из концевых тороидов [48, 51], основного тороида [48, 52] и центрального соленоида [48]. Основные параметры тороидов представлены в табл. 6. Внешний вид тороидов показан на рис. 27. Обмотки основного

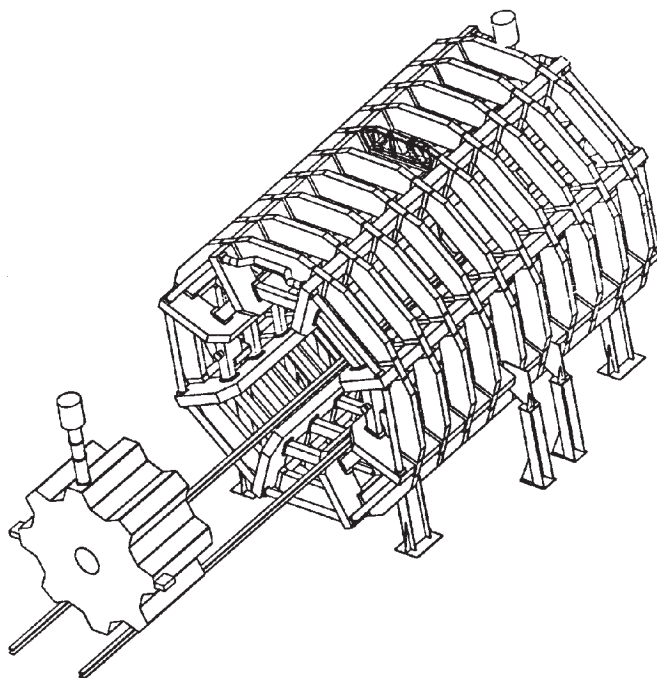


Рис. 27. Основной тороидальный магнит и выдвинутый концевой тороидальный магнит спектрометра ATLAS [49]

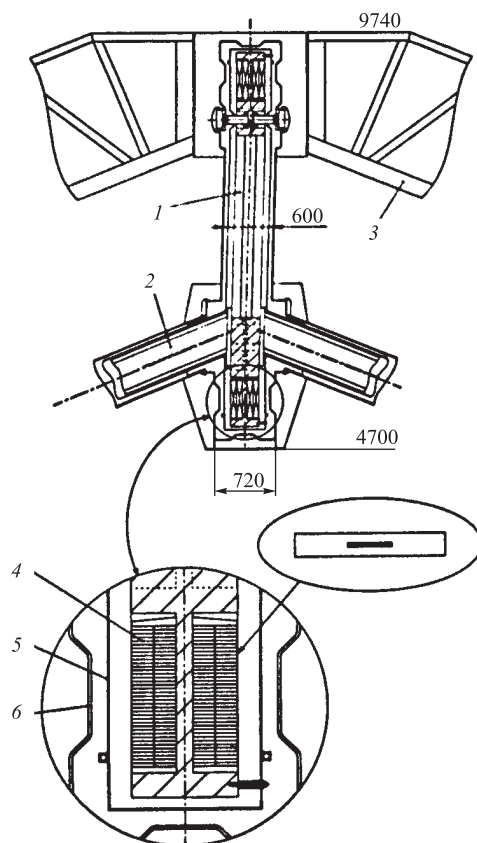


Рис. 28. Сечение собранной обмотки основного тороида спектрометра ATLAS [50]:
 1 — ребро жесткости; 2 — холодные распорки; 3 — теплые межкатушечные ребра;
 4 — обмотки; 5 — радиационный экран; 6 — рифленый вакуумный кожух

тороида заключены в индивидуальные вакуумные кожухи, а холодные части связаны тягами в жесткую структуру. Обмотки краевого тороида помещены в общий вакуумный кожух. Поперечное сечение собранной обмотки основного тороида показано на рис. 28. Опорная рама 1 собрана из элементов (алюминиевый сплав) с помощью электронно-лучевой сварки, не приводящей к последующей деформации рамы. Обмотки 4 представляют собой две галеты, уложенные в канавки рамы и пропитанные эпоксидным компаундом. Рама 1 жестко связана между собой холодными распорками 2. Для предотвращения изгибов и смещения частей рам под действием веса и нескомпенсированных

азимутальных пондеромоторных сил на их внешней части установлены скользящие опоры на вакуумный кожух. Рифленные стенки кожуха выполнены из листов нержавеющей стали толщиной 10 мм.

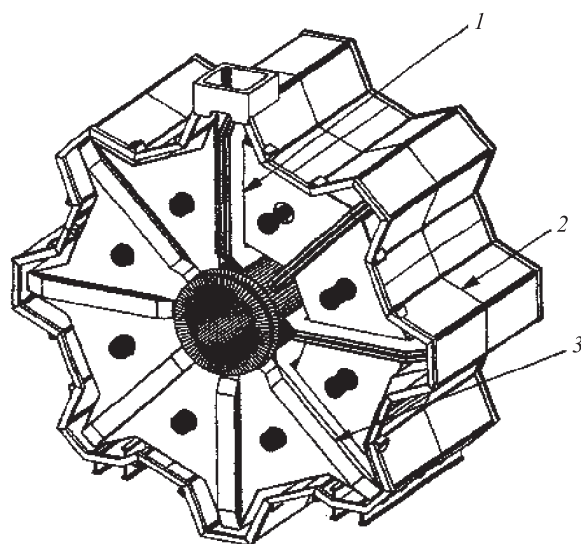


Рис. 29. Схематический вид концевой тороидальной магнита [51]: 1 — обмотка, 160 т; 2 — вакуумный кожух, 79 т; 3 — тепловой экран, 20 т

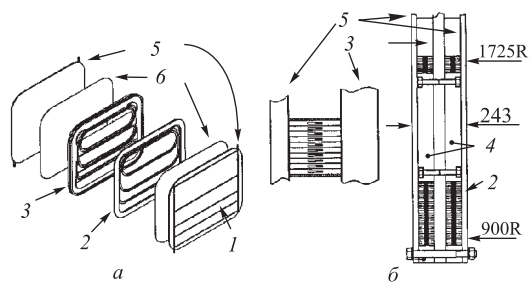


Рис. 30. Конструкция крепления обмоток концевой тороида (пояснения в тексте)

Представление о конструкции концевой тороида можно получить из рис. 29 и 30. Однослойные обмотки 2 (рис. 30) крепятся через проставки 4 с двух сторон центральной плиты 3 и зажимаются внешними пластинами 5, к которым присоединены охлаждающие трубки 1.

5. МАГНИТЫ ДЛЯ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ МИШЕНЕЙ

5.1. Серия магнитов SEN (Сакле, Франция). В спектрометрах с поляризованными мишенями используются поляризующие соленоиды, магнитные поля которых отличаются высокой однородностью в рабочем объеме мишени (порядка 10^{-5}). Требование высокой однородности обусловлено тем, что градиент магнитного поля существенно влияет на степень поляризации вещества мишени. Большое количество разнообразных соленоидов этого типа изготовлено в Сакле (табл. 7).

Таблица 7. Основные параметры магнитов SEN (Сакле) для поляризованных мишеней [53]

Параметр	Поляри- зующие поля	Вертикальное удерживающее поле	Горизонтальное удерживающее поле
Внутренний диаметр обмотки, мм	182	476	420
Наружный диаметр обмотки, мм	230	568	554
Длина обмотки, мм	360	44	94
Поле в центре, Тл	2,5	1,1	2,3
Макс. поле в обмотке, Тл	—	4,2	6,1
Расчетный ток, А	500	550	590
Средняя плотность тока в обмотке, $A \cdot mm^{-2}$	200	230	173
Ампер-витки, А	10^6	$0,44 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^6$
Запасенная энергия, кДж	35	85	480

5.2. Поляризующие магниты для подвижной поляризованной мишени.

В состав подвижной поляризованной мишени (МРТ) [54] входит сверхпроводящий поляризующий магнит [55], созданный в ОИЯИ в 1998 г. на основе документации, полученной из Сакле (Франция).

Магнит (рис. 31 и табл. 8) содержит основную обмотку 1, а также расположенные на ее концах компенсирующие 6 и корректирующие 7 обмотки. Обмотки пропитаны эпоксидным компаундом. Обмотка размещена на сварном каркасе 2 из стали 1X18H10T, состоящем из трубы и фланцев. Каркас 2 вместе с наружной обечайкой и другими деталями образует сварной гелиевый сосуд 4, который крепится в вакуумном кожухе 5 с помощью стеклотекстолитового опорного конуса 8. На медном тепловом экране 9 припаяны трубки обратного гелия. Поверх экрана размещена экранно-вакуумная изоляция 10. Токовводы и трубки ввода и вывода гелия сосредоточены в вертикальном стояке. Изоляционный вакуум создается с помощью турбомолекулярного и

форвакуумного насосов. Корректирующие обмотки имеют независимое питание от двух стабилизированных источников.

Из основных технических требований к магниту отметим следующие: индукция магнитного поля в центре магнита при максимальном рабочем токе 186 А должна составить 6,7 Тл; однородность поля в «теплом» рабочем объеме (длиной 200 мм, диаметром 30 мм) не хуже 10^{-4} .

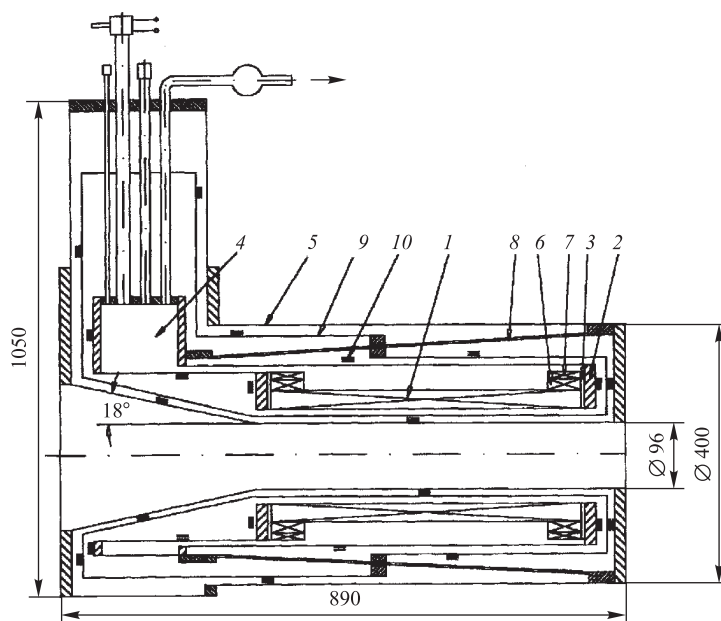


Рис. 31. Поляризирующий магнит МРТ: 1 — основная обмотка; 2 — каркас из нержавеющей стали; 3 — изолирующие полудиски; 4 — гелиевый сосуд; 5 — вакуумный кожух; 6 — компенсирующие обмотки; 7 — корректирующие обмотки; 8 — стеклотекстолитовый опорный конус; 9 — медный радиационный экран; 10 — многослойная суперизоляция

Магнитные свойства нержавеющей стали 1X18Н10Т не позволили достичь более высокой однородности поля.

Магнит устойчиво работает в физических экспериментах с пучком поляризованных нейтронов и поляризованной протонной мишенью. (Ранее подобный магнит был изготовлен в Сакле, его параметры представлены в табл. 8, [54].)

5.3. Соленоид для SMC. Крупнейший поляризирующий соленоид создан в СЕА/Сакле для коллаборации SMC (Spin Muon Collaboration) [56, 57]. Основные параметры магнита представлены в табл. 8.

Таблица 8. Основные параметры поляризующих магнитов для МРТ и SMC

Параметр	МРТ-магнит (Сакле)	МРТ-магнит (Дубна) (основной)	SMC (основной)
Диаметр «теплой» апертуры, мм	95	96	
Соленоид:			
Длина обмотки, мм		558	2000
Диаметр внутренний, мм		144	300
Диаметр наружный, мм		206	326
Индуктивность (основной и двух компенсирующих), Гн		13	5,6
Поле в центре апертуры, Тл	6,5	5,8	3,0
Однородность магнитного поля	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$< 2 \cdot 10^{-5}$
Размеры однородного поля:			
Диаметр, мм	30	30	50
Длина, мм	200	200	1500
Запасенная энергия, кДж		166	700
Провод:			
Размеры в изоляции, мм		1,06–1,09	2,08 × 1,28
Отношение Cu/NbTi		1,5/1,0	5,4/1
Литература	[54]	[55]	[56, 57]

6. МАГНИТЫ ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРОВ КОСМИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

6.1. Радиационно-прозрачный соленоид ASTROMAG. Для изучения космических частиц высоких энергий применяются спектрометры, которые устанавливаются на спутниках или поднимаются на аэростатах. Поэтому к магнитам предъявляются требования минимальной массы, высокой надежности и максимальной длительности рабочего периода. Этим требованиям наиболее всего отвечают сверхпроводящие магниты. Примером удачного выполнения этих требований может служить изготовленный в 1990 г. ультратонкий соленоид ASTROMAG (табл. 9, рис. 32) [58]. В нем достигнута наименьшая в мире радиационная толщина $0,21X_0$. Спектрометр предназначен для изучения космических лучей антиматерии на высоте до 35 км. Обмотка 1 охлаждается косвенным способом через внешний опорный цилиндр 2, приваренный концом к гелиевому сосуду 3. Этот способ больше подходит для данного эксперимента, чем охлаждение принудительной циркуляцией гелия, поскольку не требует активных элементов. Погружной вариант криостатирования здесь

Таблица 9. Основные параметры соленоида ASTROMAG

Размеры:	
Диаметр катушки, м	1,0
Длина, м	1,3
Толщина в середине, мм	5,2
Материал опорного цилиндра	Al 2219
Толщина в середине, мм	2
Криостат:	
Внешний диаметр, м	1,18
Длина, м	2,0
Материал (внешнего цилиндра)	Al сотовая композиция
Объем гелиевого сосуда, л	150
Используемая апертура, м	0,85
Поле в центре, Тл	1,2
Максимальная индукция в катушке, Тл	2,2
Рабочий ток, А	520
Число витков	3383
Индуктивность, Гн	6,03
Запасенная энергия, кДж	815
Толщина стенок, X_0	0,21
Суммарная масса, кг	430
Проводник:	
Сверхпроводник	NbTi/Cu
Al	(99,999%)
RRR	> 1000
NbTi/Cu/Al	1/1/7,3
Сечение, мм ²	1,2 × 1,8
I_c (при 3,8 Тл, 4,2 К), А	930

также неприменим, так как приводит к увеличению радиационной толщины и массы соленоида. Малая радиационная толщина достигнута за счет применения как традиционных приемов конструирования тонких соленоидов, так и новых решений. К числу первых относится тотальное использование алюминия и его сплавов, в том числе алюминия высокой чистоты в проводнике, высокопрочного сплава в опорном цилиндре, сотовое исполнение наружной

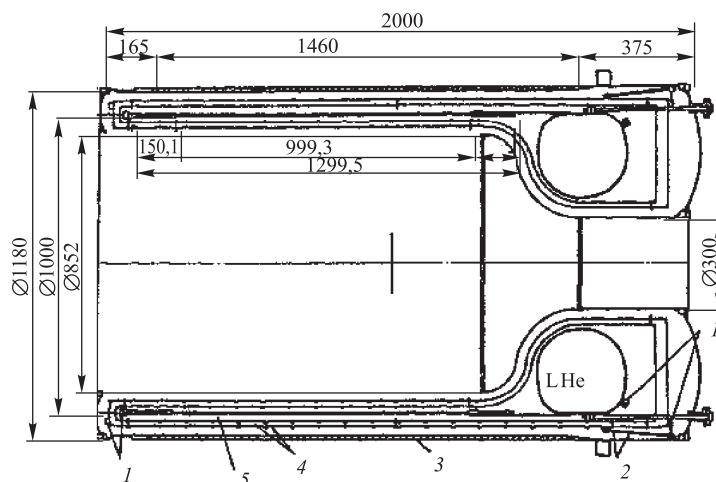


Рис. 32. Соленоид ASTROMAG. 1 — радиальные опоры; 2 — осевые опоры; 3 — вакуумный кожух; 4 — тепловой экран; 5 — сверхпроводящая обмотка

обечайки вакуумного кожуха, внутренней навивки обмотки. К новым решениям относится существенное повышение плотности тока в проводнике — $240 \text{ A} \cdot \text{мм}^{-2}$, что выше, чем, например, в магните ZEUS, в 3,1 раза (см. табл. 4). Для предотвращения чрезмерного роста температуры самой нагретой точки обмотки при переходе разработана новая концепция защиты соленоида. На поверхность обмотки наклеены полосы из алюминия высокой чистоты. Их теплопроводность так велика, что позволяет быстро передать тепло от места первоначального перехода на остальные витки. Соленоид был успешно испытан в режиме «замороженного» тока при 512 А. Поле снижалось с постоянной времени в 900 лет. Запаса гелия хватает на 6 сут. Подвеска холодной массы в вакуумном кожухе осуществляется с помощью тяг, позволяющих выдержать удар спектрометра при приземлении.

6.2. Дипольный магнит с криокулером. Фирма «Toshiba» изготовила дипольный магнит, охлаждаемый криокулером. Магнит предназначен для исследования солнечных частиц. Основные параметры магнита даны в табл. 10, конструкция представлена на рис. 33 [59]. Две рейстрекковые обмотки 1 укреплены в корпусе из нержавеющей стали 19 и охлаждаются 2-й ступенью криокулера 11 через медный стержень 13. Токовводы снабжены вставками из высокотемпературного сверхпроводника 12. Обмотки работают в режиме «замороженного» тока. Для электрической защиты (рис. 34) обмотка секционирована, секции закорочены через холодные диоды и резисторы. Холодная

Таблица 10. Основные параметры дипольного магнита фирмы «Toshiba»

Катушка:	
Форма	Рейстрек
Количество	2
Толщина и высота катушки, мм	50/64
Внутренний/внешний радиус катушки, мм	50/100
Длина рейстрека, мм	2100
Расстояние между катушками, мм	20
Масса одной катушки, кг	133,5
Число витков в одной катушке	1809
Электрические и магнитные параметры:	
Рабочий ток, А	336
Поле в центре, Тл	5,0
Максимальное поле, Тл	7,18
Индуктивность, Гн	15,5
Запасенная энергия, кДж	875
Холодная масса при 4 К, кг	670
Криокулер:	
количество	2
мощность (при 50 Гц): 1-я ступень, 40 К, Вт	20
2-я ступень, 4,2 К, Вт	0,5

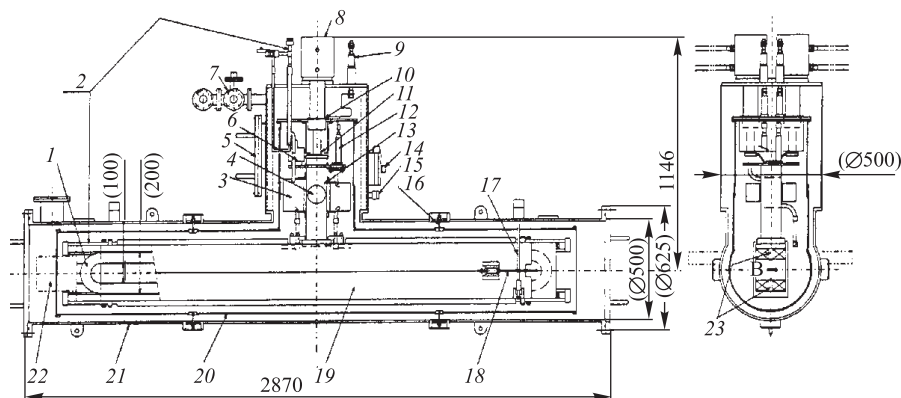
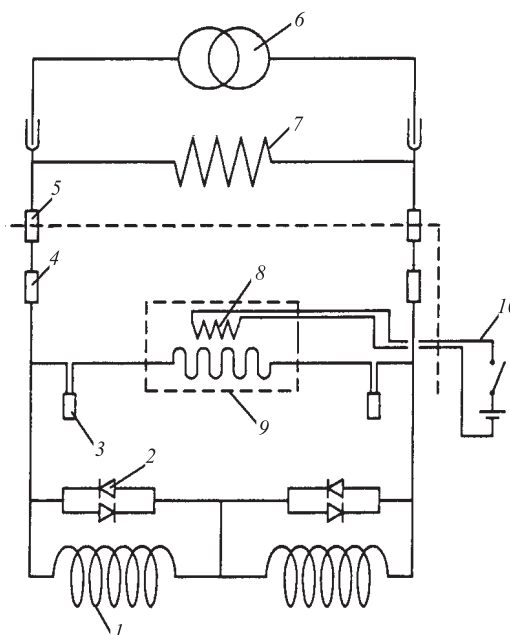


Рис. 33. Дипольный магнит фирмы «Toshiba» для исследования солнечных частиц: 1 — рейстрекковые обмотки; 2 — охлаждающие трубки; 3 — резервуар с жидким гелием; 4 — диоды; 5 — сервисный порт; 6 — сверхпроводящий ключ; 7 — выводы для измерений; 8 — криокулер; 9 — медный участок токовводов; 10 — 1-я ступень криокулера; 11 — 2-я ступень криокулера; 12 — Bi 2223 токовводы; 13 — теплопроводящий стержень; 14 — вакуумный клапан; 15 — вакуумный предохранительный клапан; 16 — опора экрана; 17 — гравитационная опора; 18 — опора; 19 — каркас обмотки (нержавеющая сталь); 20 — тепловой экран при 40 К; 21 — вакуумный сосуд; 22 — детектор; 23 — теплопроводная пластина

масса довольно велика (670 кг), однако несмотря на ограниченную мощность криокулеров ($2 \times 0,5$ Вт при 4,2 К) охлаждение осуществляется достаточно быстро (300 ч).

Рис. 34. Принципиальная электрическая схема питания и защиты дипольного магнита фирмы «Toshiba»: 1 — рейстрекковые обмотки; 2 — диоды при 4 К; 3 — сверхпроводящие контакты сверхпроводника; 4 — Вi 2223 токовводы; 5 — токовводы; 6 — источник электропитания; 7 — гасительный резистор; 8 — нагреватель; 9 — ключ «замороженного» тока; 10 — питание и выключение нагревателя



Свойства магнитов с криокулерами весьма привлекательны и состоят в простоте и дешевизне эксплуатации, автономности, высокой надежности работы.

7. МАГНИТЫ ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА

В настоящее время освоено промышленное производство ленты из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП). Приведем в качестве примера некоторые данные о свойствах ленты, выпускаемой фирмой «American Superconductor» ([60], табл. 11). Величина критического тока ленты имеет сильную зависимость от величины и направления внешнего магнитного поля и существенно повышается при снижении температуры (рис. 35).

Изготовлены и испытаны разнообразные ВТСП-соленоиды с индукцией в центре 1–3 Тл. Например, объединение японских фирм «Toshiba», «Sumitomo» и др. создало установку с ВТСП-соленоидом, охлаждаемым криоку-

Таблица 11. Основные параметры ВТСП-ленты фирмы «American Superconductor»

Толщина, мм	0,21–0,32
Ширина, мм	3,9–5,0
I_c , А (при $T = 77$ К, $H = 0$)	115–145
Мин. допустимый радиус изгиба, мм	50–100
Макс. допустимое растягивающее напряжение, мПа (при $T = 77$ К)	65–300

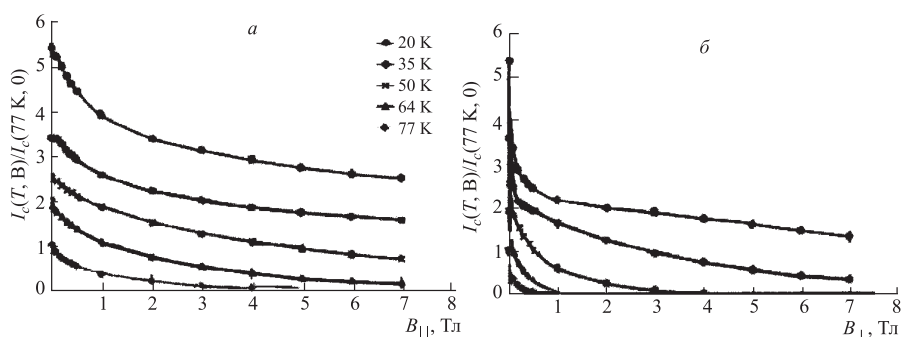


Рис. 35. Зависимость критического тока ВТСП-ленты от температуры и индукции поля, параллельного (а) и перпендикулярного (б) плоскости ленты

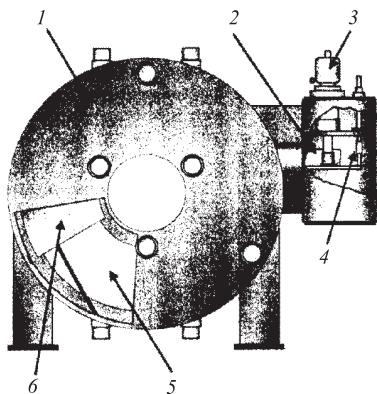


Рис. 36. Схематический чертеж установки с ВТСП-соленоидом: 1 — вакуумный кожух; 2 — теплопроводная пластина; 3 — криокулер; 4 — ВТСП-токовводы; 5 — ВТСП-соленоид; 6 — радиационный экран при 80 К

лером. Параметры соленоида представлены в табл. 12. Установка (рис. 36) использована для выращивания кристаллов кремния [61].

Таблица 12. Параметры ВТСП-соленоида [61]

Материал ленты	Bi 2223 с Ag-покрытием, оболочка из нержавеющей стали
Размеры ленты, мм	1,1 × 4,5
Число плоских катушек	18 × 2
Наружный диаметр обмотки, мм	1200
Внутренний диаметр обмотки, мм	600
Полная длина ленты, км	80
Рабочая температура, К	< 20
Рабочий ток, А	210
Плотность тока, А · мм ⁻²	33
Запасенная энергия, МДж	1,1
Макс. осевое поле, Тл	3
Макс. радиальное поле, Тл	1,8
Фактор загрузки при 20 К, %	72
Макс. время запитки, мин	1

Высокий критический ток достигается в ВТСП-обмотках при температурах существенно ниже 78 К. Экономически целесообразно использовать рабочую температуру 18–20 К. Однако лента во много раз дороже NbTi-сверхпроводника и менее технологична при изготовлении обмоток.

8. ВЫВОДЫ

На основе настоящего обзора можно сделать следующие выводы о преобладающих конструктивных решениях и тенденциях развития СПМ-систем.

1. Период 1969–1972 гг. отмечен высшим достижением сверхпроводящей техники — созданием крупнейших сверхпроводящих соленоидов для водородных пузырьковых камер (12-футовая камера, BEBC и др.). Дальнейший прогресс в области изготовления сверхпроводящих магнитов для физики частиц высоких энергий не так нагляден, но очень существен (спектрометры ALEPH, DELPHI и др.). Отход от принципа полной криостатической стабилизации сверхпроводника позволил радикально уменьшить величину холодной массы магнита, упростить и удешевить стоимость криостатов и в большинстве случаев обойтись без погружения обмоток в жидкий гелий.

2. Для использования в спектрометрах встречных пучков создан новый класс сверхпроводящих соленоидов с радиационно-прозрачными стенками (спектрометры VENUS, ZEUS, ATLAS и др.). Для достижения эффекта относительной «прозрачности» для проходящих через стенку частиц использо-

ваны следующие приемы: стабилизация чистым алюминием плоского кабеля из многожильного NbTi-проводника, использование высокопрочных алюминиевых сплавов в деталях для каркаса обмотки и стенок криостата и теплового экрана, косвенное криостатирование обмоток, высокая плотность тока в обмотке и соответствующие методы ее аварийной защиты. Кроме того, для подобного спектрометра создан крупнейший в мире по запасенной энергии (2520 МДж) и размерам апертуры (5,9 м) соленоид на 4 Тл (CMS) с многослойной обмоткой, погруженной в жидкий гелий.

3. Крупные дипольные магниты («Omega», диполь Морпурго и др.) были построены в 1972–1978 гг. В дальнейшем подобные магниты не получили широкого распространения и существенного развития. В некоторых случаях даже произошел возврат к теплым магнитам (спектрометры ALICE и др.). Преобладала потребность в осесимметричных спектрометрах, для которых больше всего подходят соленоиды и тороиды.

4. Тороидальные магниты достигли необычайно больших размеров и высочайшей сложности конструкции (спектрометр ATLAS). Эти магниты можно считать вершиной инженерной мысли. При их создании использовался опыт изготовления «сухих» обмоток для соленоидов.

5. Успешно развивались поляризующие магниты, размеры которых росли при сохранении уровня высокой однородности магнитного поля (например, соленоид для коллаборации SMC).

6. Весьма интересные решения найдены при создании магнитов для спектрометров космических частиц. К их числу можно отнести соленоиды с наивысшей радиационной «прозрачностью» (ASTROMAG) и охлаждаемый криокулером дипольный магнит. Для криостатирования небольших СПМ перспективно использование автономных газовых холодильных машин — криокулеров.

7. Одно из направлений прогресса в создании магнитов связано с недавним освоением промышленного производства проводников из высокотемпературных сверхпроводников. Уже есть примеры изготовления довольно крупных соленоидов из плоского кабеля.

8. В целом масштаб использования и огромный прогресс в области сверхпроводящих магнитов очевиден и позволяет сделать вывод о возможности обеспечения практически любых потребностей в магнитах для физики частиц высоких энергий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. М.: Мир, 1976.
2. Хухарева И. С., Шишов Ю. А. Сверхпроводящие магнитные системы // Криогенные приборы и устройства в ядерной физике / Под ред. А. Г. Зельдовича. М., 1982. Гл. 3.

3. *Bogner G.* The development of large superconducting d. c. magnets in Europe — present and future applications // Proc. of Applied Superconductivity Conf., Annapolis, USA, 1972. IEEE Pub. No. 72 CH 0682-5-TABSC. P. 214–225.
4. *Eschricht W. et al.* The operation of a three coil 5 megajoule superconducting magnet system at the electron–positron storage ring DORIS // Proc. of the 5th Intern. Conf. on Magnet Technology, Roma, 1975. P. 85–92.
5. *Green M.A.* Large superconducting detector magnets with ultra thin coils for use in high-energy accelerators and storage rings // Proc. of the 6th Intern. Conf. on Magnet Technology, Bratislava, 1977. P. 429–442;
Green M.A. LBL-6717. USA. 1977.
6. *Morpurgo M.* Design and construction of a superconducting aluminium stabilised solenoid // Cryogenics. 1977. V. 17, No. 2. P. 89–90.
7. *Kantardjan G.* Installation and performance of a «transparent» coil superconducting solenoid for the proton storage rings (CERN–ISR) // Proc. of the 6th Intern. Conf. on Magnet Technology, Bratislava, 1977. P. 703–707.
8. *Yamada R. et al.* Characteristics of thin wall superconducting solenoid magnets and its model test results // Proc. of ICEC-9. 1982.
9. *Desportes H.* High energy physics superconducting magnet program at Saclay // Proc. of the 6th Intern. Conf. on Magnet Technology, Bratislava, 1977. P. 474–479.
10. *Green. M.A. et al.* // IEEE Trans. Magnet. 1979. V. MAG-15, No. 1. P. 128.
11. *Green M.A. et al.* Ground plane insulation failure in the first TPC superconducting coil // IEEE Trans. Magnet. 1981. V. MAG-17, No. 5. P. 1855–1859; LBL-12326. 1981.
12. *Wand R. et al.* Design of an indirectly cooled 3-m diameter superconducting solenoid with external support cylinder for the Fermilab collider detector facility // Proc. of ICEC-9. 1982.
13. *Past R. et al.* Design report for an indirectly cooled 3-m superconducting solenoid for the Fermilab collider detector facility. TM-1135, 2750.000. FNAL, USA. 1982.
14. *Hirabayashi H.* Detector magnet technology for high energy accelerators // Proc. of the 11th Intern. Cryog. Engin. Conf., Berlin-West, 1986. P. 115–126.
15. *Yamamoto A. et al.* Performance of the TOPAZ thin superconducting solenoid wound with internal winding method // Japan. J. Appl. Phys. 1986. V. 25, No. 6. P. 440–442.
16. *Baze J.M. et al.* Design, construction and test of the large superconducting solenoid ALEPH // IEEE Trans. Magnet. 1988. V. 24, No. 2. P. 1260–1263.
17. *Apsey R.Q. et al.* Design of a 5.5 metre diameter superconducting solenoid for the DELPHI particle physics experiment at LEP // IEEE Trans. Magnet. 1986. V. MAG-21, No. 2. P. 490–493.
18. *Bonito Oliva A. et al.* ZEUS magnets construction statue report // Proc. MT-11. Japan, 1989. P. 228–234.
19. *Bonito Oliva A. et al.* ZEUS thin solenoid: test results analysis // IEEE Trans. Magnet. 1991. V. 27, No. 2. P. 1954–1957.
20. CMS. The Compact Muon Solenoid Technical Proposal. CERN LHCC 94-38 LHCC/P1 15. 1994. P. 9–19.
21. ATLAS Central Solenoid Technical Design Report. CERN/LHCC/97-21 ATLAS TDR 9 30. 1997. P. 12.
22. *Bogner G.* The development of large superconducting d.c. magnets in Europe — present and future applications // Proc. of the Applied Superconductivity Conf., Annapolis, Maryland, USA, 1972. IEEE Pub. No. 72CH0682-5-TABSC6. P. 214–225.

23. *Desportes H.* Superconducting magnet for accelerator, beam lines and detectors // *IEEE Trans. Magnet.* 1981. V. MAG-17, No. 5. P. 1560–1566.
24. *Morpurgo M.* A large superconducting dipole cooled by forced circulation of two phase helium // *Cryogenics.* 1979. V. 19, No. 7.
25. *Хейм Дж. Р.* Сверхпроводящие магнитные системы в Лаборатории им. Э. Ферми // Тр. конф. по техническому использованию сверхпроводимости. Алушта, 1975. М., 1977. Т. II. С. 120–132.
26. *Heim J., Fast R.* // *IEEE Trans. Magnet.* 1975. V. MAG-11, No. 2. P. 471.
27. *Inagaki T. et al.* Large aperture superconducting magnet (Benkei) // *Cryogenics.* 1984. V. 24, No. 2. P. 83–89.
28. *Shintomi T. et al.* Performance of a large superconducting spectrometer magnet — SKS // *IEEE Trans. Magnet.* 1992. V. 28, No. 1. P. 585–588.
29. *Shintomi T. et al.* Design of a large superconducting spectrometer magnet // *IEEE Trans. Magnet.* 1989. V. 25, No. 2. P. 1667–1670.
30. *Shintomi T. et al.* Construction of a large superconducting spectrometer magnet // *IEEE Trans. Magnet.* 1991. V. 27, No. 2. P. 1961–1964.
31. *Shintomi T. et al.* Design and construction of a large superconducting spectrometer magnet // *Proc. MT-11. Japan, 1989.* P. 354–359.
32. *Miller J.A. et al.* Cryostat design and magnetostatic analysis of the 6 GeV superconducting dipole for the CEBAF High Momentum Spectrometer // *IEEE Trans. Magnet.* 1991. V. 27, No. 2. P. 2292–2295.
33. *Bogensberger P. et al.* Cryogenics in CEBAF HMS dipole // *Adv. Cryog. Eng. N. Y.; London,* 1994. V. 39. P. 381–388.
34. *Bogensberger P. et al.* Design and manufacture of the dipole coil for the CEBAF high momentum spectrometer // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1993. V. 3, No. 1. P. 797–800.
35. *Gavalya A.R. et al.* Design of the superconducting 45 degree dipole for the CEBAF High Resolution Spectrometer // *IEEE Trans. Magnet.* 1991. V. 27, No. 2. P. 2296–2299.
36. *Borisovskay Z.V. et al.* Magnet system of ALICE forward muon and *pp* spectrometer. ALICE/95-08, Internal Note/MAG. 1995.
37. *Akishin P.G. et al.* Superconducting dipole magnet for ALICE dimuon arm spectrometer (conceptual design report) // *JINR Rapid Commun.* 1997. No. 1[81].
38. The Forward Muon Spectrometer of ALICE. LHCC/P3-Addendum 1, CERN/LHCC 96-32. 1996. P. 5–10.
39. *Akishin P.G. et al.* Conceptual design of the warm dipole magnet for ALICE forward muon spectrometer. Internal Note/MAG ALICE/96-26. 1996.
40. Dimuon forward spectrometer ALICE. Technical design report. CERN/LNCC 99-22 ALICE TDR 5.13. 1999.
41. *Swoboda D. et al.* Design and status of the dipole spectrometer magnet for the ALICE experiment // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1999. V. 10. P. 411–414.
42. *Anischenko N. et al.* Modelling of the dipole magnet coils for the ALICE dimuon arm spectrometer // *Proc. of the XVI Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems (ISHEPP XVI) «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics», Dubna, June 10–15, 2002. Dubna, 2004.* V. II. P. 82–89.
43. *CERN Courier.* 1992. V. 32, No. 10. P. 16.

44. *Imazato J. et al.* A superconducting toroidal magnet for charged particle spectroscopy // Proc. MT-11. Japan, 1989. P. 368–371.
45. *Wittgenstein F.* // IEEE Trans. Magnet. 1992. V. 28, No. 1. P. 104–112.
46. *Meara J.O. et al.* A superconducting toroidal magnet for the CEBAF large acceptance spectrometer // IEEE Trans. Magnet. 1989. V. 25, No. 2. P. 1902–1905.
47. *Andreev S.V. et al.* Some characteristics of the superconducting magnetic system of toroidal spectrometer STORS. JINR, EI-93-384. Dubna, 1993.
48. ATLAS Magnet System Technical Design Report. CERN/LHCC/97-18 ATLAS TDR 6. 1997.
49. The ATLAS Magnet System // LHC News. 1994. No. 6(12/94). P. 10–14.
50. ATLAS. Technical Proposal for a General-Purpose pp Experiment at the LHC at CERN. CERN/LHCC/94-43, LHCC/P2. 1994.
51. ATLAS End-Cap Toroids Technical Design Report. CERN/LHCC/97-20 ATLAS TDR 8. 1997.
52. ATLAS Barrel Toroid Technical Design Report. CERN/LHCC/97-19 ATLAS TDR 7. 1997.
53. *Deregel J. et al.* Superconducting magnet system for the N - N polarized beam-target experiment at Saclay // IEEE Trans. Magnet. 1981. V. MAG-17, No. 5. P. 1875–1878.
54. *Chaumette P. et al.* First use of the polarized target facility at Fermilab // Proc. of the 9th Intern. Symp. High Energy Spin Physics. Bonn, 1990. V. 2: Workshops. P. 237–240.
55. *Anishchenko N.G. et al.* High magnetic field uniformity superconducting magnet for a movable polarized target // JINR Rapid Commun. 1998. No. 6[92]. P. 49–54.
56. *Dael A. et al.* A superconducting 2.5 T high accuracy solenoid and a large 0.5 T dipole magnet for the SMC target // IEEE Trans. Magnet. 1992. V. 28, No. 1. P. 560–563.
57. *Dael A. et al.* Construction and test of a superconducting high accuracy solenoid for the SMC polarized target // XVth Intern. Conf. on High Energy Accelerators. HAMBOURG-RFA-1992. P. 650–652.
58. *Makida Y. et al.* Progress of superconducting magnet // Proc. of the 3rd Workshop on Balloon-borne Experiments with Superconducting Magnet Spectrometers, KEK, Japan, Feb. 24–25, 1992. P. 17–22.
59. *Sato Y. et al.* Development of a cryogen-free superconducting dipole magnet // Proc. of the 15th Intern. Conf. on Magnet Technology. Science Press, 1997. P. 262–265.
60. www.amsuper.com; 2004.
61. *Ono M. et al.* Testing of a cryocooler-cooled HTS magnet with silver-sheathed Bi2223 tapes for silicon single-crystal growth applications // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2002. V. 12, No. 1. P. 984–987.