

05; 10; 12
© 1992 г.**СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СОЛЕНОИД ДЛЯ УСТАНОВКИ НА ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКАХ***И. А. Вишняков, А. П. Воробьев, В. Ф. Кечкин, В. И. Клюхин, Е. А. Козловский,
В. Х. Маляев, Г. И. Селиванов*

Предлагается конструкция магнитной системы, разработанная в рамках проекта универсального калориметрического детектора для коллайдера УНК 3×3 ТэВ. Рассматривается вариант создания магнитного поля с неоднородностью $\sim 1\%$ и индукцией 1.5 Тл с помощью широкоапертурного сверхпроводящего соленоида диаметром 5.3 м и длиной 6.36 м.

Введение

Одной из общепринятых концепций построения крупномасштабных экспериментальных детекторов частиц на встречных pp - и $p\bar{p}$ -пучках является использование однородного магнитного поля с индукцией 0.7—1.5 Тл в центральной части установки. Величина индукции магнитного поля определяется необходимым разрешением по импульсу регистрируемых частиц, а неоднородность поля — условиями работы трековой системы установки. В современных детекторах частиц объем, содержащий магнитное поле, составляет десятки кубических метров, поэтому создание соответствующих магнитных систем является сложной физико-технической задачей.

В настоящей работе предлагается магнитная система, которая разработана в рамках проекта универсального калориметрического детектора (УКД) [1] для коллайдера УНК 3×3 ТэВ. Рассматривается вариант создания магнитного поля с неоднородностью $\sim 1\%$ и индукцией 1.5 Тл с помощью широкоапертурного сверхпроводящего (СП) соленоида диаметром 5.3 м и длиной 6.36 м.

В предлагаемой конструкции учтены требования обеспечения высокой степени надежности, эксплуатационной безопасности и стабильности параметров сверхпроводящего соленоида. В расчет принимались также требования удобства монтажа и обслуживания соленоида и ограничения, обусловленные производственными и транспортными проблемами.

Перспективный характер такой разработки соответствует тенденциям развития методики регистрации частиц.

Исходные данные и оптимизация конструкции соленоида

Исходные данные для разработки конструкции соленоида задаются не только величиной индукции и неоднородностью магнитного поля, но и геометрическими размерами установки УКД. Как показано на рис. 1, внутри СП соленоида кроме центральной трековой системы (ЦТС), занимающей цилиндрический объем диаметром 2.8 и длиной 3.2 м, размещаются также электромагнитный и адронный жидкоаргоновые калориметры, что фиксирует минимальный внутренний диаметр соленоида величиной 4.96 м. Из условий минимизации веса внешнего магнитопровода соленоида и веса самого соленоида длина соленоида ограничена величиной 7 м.

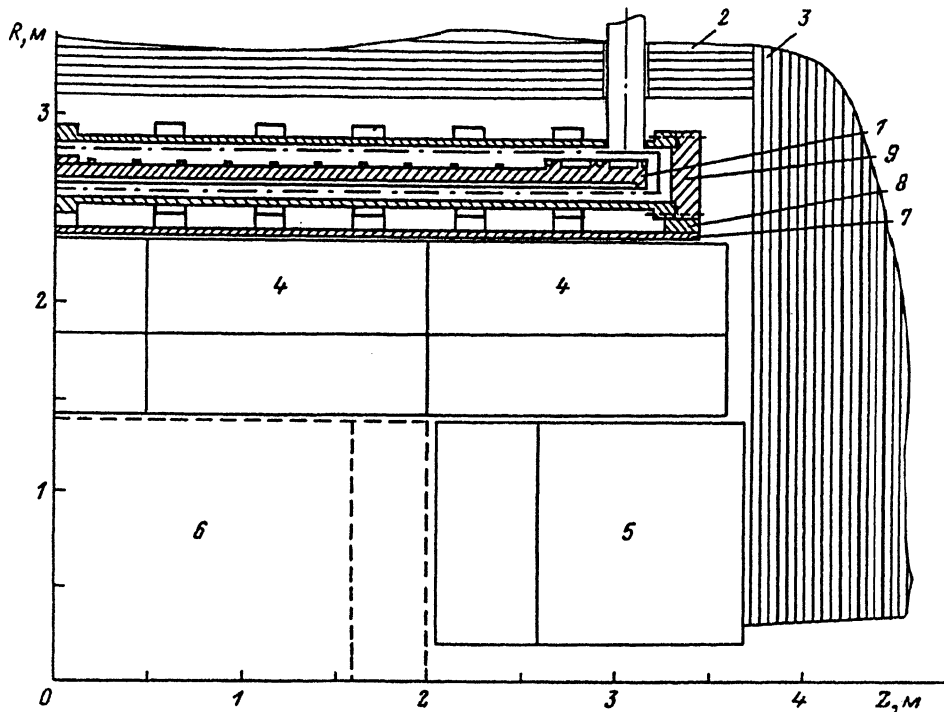


Рис. 1. Компоновка центральной части УКД.

1 — сверхпроводящий соленоид, 2 — центральная часть магнитопровода (кэтчера), 3 — торцевые крышки кэтчера, 4 — центральные модули жидкоаргонового калориметра, 5 — торцевые модули жидкоаргонового калориметра, 6 — центральная трековая система, 7 — наружная обечайка криостата жидкоаргонового калориметра, 8 — промежуточные опоры, 9 — кольцевые крышки криостата соленоида.

Внешний магнитопровод (кэтчер) в установке УКД выполняет две функции. Во-первых, он замыкает магнитный поток поля соленоида, во-вторых, используется в качестве заключительной части адронного калориметра. Конструктивно кэтчер выполнен из разъемной центральной части в виде многослойника, двух торцевых крышек и имеет слоистую структуру из стальных пластин толщиной 70 мм с зазорами 22 и 25 мм между ними.

Для оптимизации размеров СП соленоида и согласования их с размерами детекторных частей установки проведено математическое моделирование магнитной системы. Величина магнитной индукции и неоднородность поля для различных вариантов системы получены численными методами с помощью программы POISSON версии 3.00 [2].

В основе моделирования лежит описание магнитной системы с помощью неоднородного уравнения Пуассона [3], учитывающего цилиндрическую симметрию установки относительно оси пучка (ось z) и соответствующие краевые условия. Для нелинейной зависимости магнитной проницаемости материала кэтчера от напряженности магнитного поля в расчетах были использованы данные, полученные экспериментально [4].

Эффект слоистости кэтчера, используемого в качестве магнитопровода, приводит к увеличению радиальной компоненты магнитного поля соленоида. Уменьшение величины радиальной компоненты может быть достигнуто большой длиной катушки соленоида, приближением торцевых крышек кэтчера к концам соленоида, введением в конструкцию соленоида специальных корректирующих катушек на обоих концах основной катушки. Все эти возможности были изучены при моделировании магнитной системы.

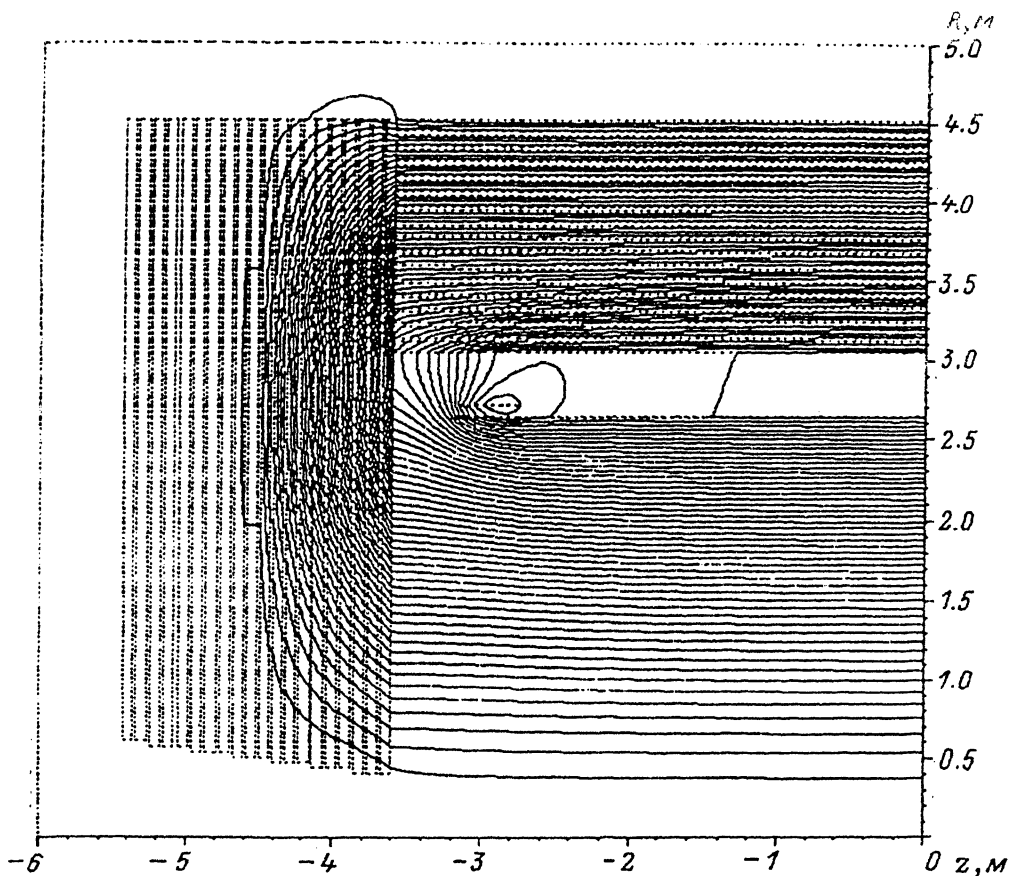


Рис. 2. Сечение плоскостью, проходящей через ось пучка, магнитной системы УКД (1/4 часть) и эквипотенциальных поверхностей, описывающих решение уравнения Пуассона, для окончательно-го варианта системы.

Таблица 1
Зависимость $B-H$, использованная в проведенных расчетах СП соленоида

B , Тл	H , А/м	B , Тл	H , А/м	B , Тл	H , А/м
0.0	0.0	1.80	7480.0	2.250	99480.0
0.4	149.0	1.85	9550.0	2.275	119400.0
0.80	244.0	1.90	12330.0	2.350	171100.0
1.00	328.0	1.95	15920.0	2.400	212500.0
1.20	470.0	2.00	19900.0	2.500	286500.0
1.40	820.0	2.050	25470.0	2.550	334200.0
1.50	1273.0	2.100	33420.0	2.675	429700.0
1.55	1751.0	2.125	38200.0	2.850	565000.0
1.60	2228.0	2.150	43770.0	3.200	843500.0
1.65	2984.0	2.175	52520.0	4.275	1695000.0
1.70	5730.0	2.200	66050.0	12.130	7958000.0

Основные параметры соленоида

Индукция магнитного поля в центре апертуры	1.5 Тл
Неоднородность поля в зоне ЦТС (диаметр 2800, длина 3200 мм)	< 1.4%
Рабочий ток основной обмотки и корректирующих обмоток	5500 А 6100 А
Запасенная энергия	$140 \cdot 10^6$ Дж
Индуктивность	9 Гн
Диаметр средний и длина основной обмотки	5300(5278) мм 6360(6334) мм
Диаметр средний и длина корректирующих обмоток	5458(5436) мм 400(398) мм
Число витков основной обмотки	1410
Число витков корректирующих обмоток	2×88
Масса катушки	27 т
Габаритные размеры криостата:	
диаметр наружный	5880 мм
диаметр внутренний	4960 мм
длина	7000 мм
Полная масса соленоида с криостатом	65 т

Примечание. В скобках приведены размеры при рабочей температуре 5 К.

В проведенных расчетах диаметр основной катушки менялся от 5 до 5.3 м, ее длина от 5.8 до 6.4 м, расстояние от концов соленоида до торцевых крышек составляло 0.4—0.6 м, вводились две корректирующие катушки длиной 0.2—0.4 м каждая, сила тока в основной и корректирующих катушках менялась от 5.1 до 6.2 кА, под обрез основной катушки соленоида вводились ферромагнитные вставки различного диаметра, закрепленные на торцевых крышках кэтчера.

В процессе моделирования оптимальные результаты по однородности магнитного поля СП соленоида были достигнуты при диаметре основной катушки 5.2 м, ее длине 6.4 м, расстояниях между концами соленоида и торцевыми крышками 0.4 м, длине каждой из корректирующих катушек 0.4 м, силе тока в основной катушке 5.1 кА и в корректирующих катушках 5.5 кА. При этих параметрах неоднородность магнитного поля в объеме ЦТС составляет менее 1%. Величина индукции поля в центре соленоида составляет 1.4 Тл.

В окончательной конструкции соленоида диаметр основной катушки был выбран 5.3 м, ее длина 6.36 м, сила тока в основной и корректирующих катушках была увеличена соответственно до 5.5 и 6.1 кА. При этих параметрах неоднородность магнитного поля в объеме ЦТС составляет менее 1.4%, индукция магнитного поля в центре соленоида равна 1.5 Тл. На рис. 2 показано распределение изолиний векторного потенциала магнитного поля, полученное в результате расчетов с помощью программы POISSON для 1/4 части конструкции магнитной системы.

Кривая $B-H$, используемая для описания нелинейной зависимости магнитной проницаемости материала кэтчера от напряженности магнитного поля, дана в табл. 1:

На рис. 3 представлены значения азимутальной составляющей B_z (а) и радиальной составляющей B_r (б) индукции магнитного поля соленоида как функции продольной координаты Z для различных значений радиального расстояния r от оси Z .

Оба рисунка описывают магнитное поле для окончательно выбранной конструкции СП соленоида.

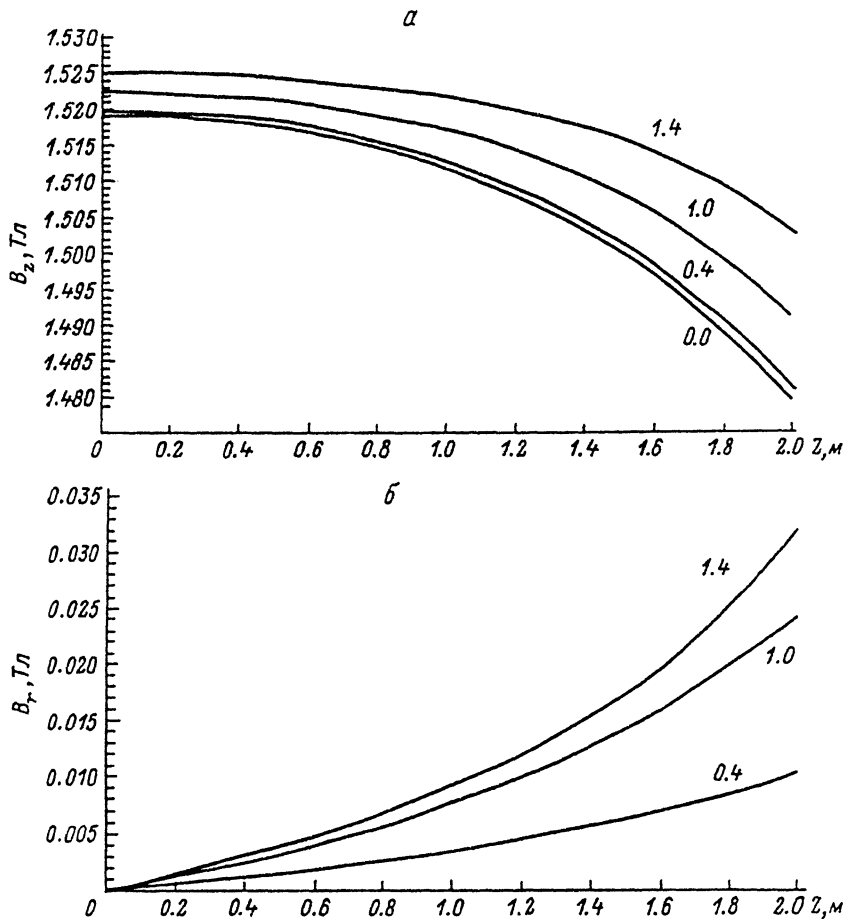


Рис. 3. Зависимость от продольной координаты z азимутальной (а) и радиальной (б) составляющих индукции магнитного поля СП соленоида на различных радиальных расстояниях от оси Z (цифры — R в м).

Конструкция сверхпроводящего соленоида

При разработке предлагаемой конструкции СП соленоида учтен опыт ведущих физических лабораторий по созданию больших соленоидов для экспериментальных установок на встречных пучках частиц [5—8]. Характерными особенностями подобных конструкций являются использование предварительно напряженных однослойных обмоток, не имеющих внутреннего несущего каркаса; применение косвенного циркулярного охлаждения обмоток; использование наружного силового бандажа обмоток в качестве вторичного контура пассивной защиты соленоида; применение частично стабилизированных проводников с матрицей из алюминия высокой чистоты в сочетании с высокоэффективными системами защиты и вывода запасенной энергии; наличие значительного (2—2.5-кратного) запаса по токонесущей способности сверхпроводника; использование высокопрочных конструкционных материалов с большой радиационной длиной.

Общий вид СП соленоида представлен на рис. 4. основополагающими элементами конструкции являются криостат 1 и сверхпроводящая катушка 2, состоящая из основной обмотки и двух корректирующих обмоток на ее концах.

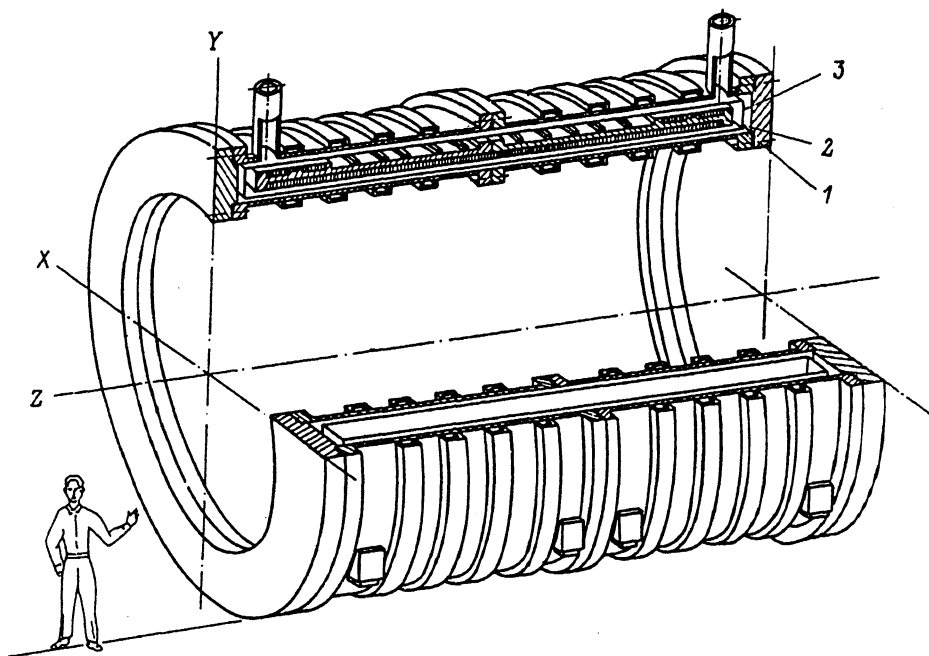


Рис. 4. Общий вид сверхпроводящего соленоида.

1 — криостат, 2 — сверхпроводящая катушка, 3 — терморadiационный экран.

Основные параметры СП соленоида приведены в табл. 2.

Основная и корректирующие обмотки выполняются из композитного проводника одного и того же типа. Проводник представляет собой плоскую шину прямоугольного сечения из алюминия с чистотой 99.995% и отношением удельных сопротивлений $\rho_{300K} / \rho_{5K} = 750-1000$. Внутри шины расположен транспонированный сверхпроводящий кабель. Поперечные размеры шины выбраны так, чтобы при аварийном переходе в нормальное состояние и отказе системы вывода запасенной энергии максимальная температура в обмотке не превышала 100 К. Требуемый уровень стабильности проводника по отношению к мгновенным тепловым возмущениям обеспечивается двукратным запасом по его токнесущей способности. Основные параметры композитного проводника представлены в табл. 3.

Предлагаемая конструкция СП соленоида показана на рис. 5. Композитный проводник основной обмотки 1 укладывается в один слой узкой стороной на изолированную внутреннюю поверхность каркаса-бандажа 3. Корректирующие обмотки 2 располагаются на наружной поверхности концевых частей каркаса и соединены последовательно с основной обмоткой на торцах СП катушки. Подстройка тока корректирующих обмоток предусмотрена в пределах 10% от его номинального значения.

Для упрощения технологии изготовления, транспортировки и монтажа катушку предполагается выполнить из двух модулей, жестко связанных между собой фланцевым соединением. Толщина наружного каркаса-бандажа катушки, изготавливаемого из высокопрочного алюминиевого сплава, выбрана исходя из требований обеспечения необходимой механической прочности и устойчивости, а также из условий работы каркаса как вторичного контура пассивной защиты соленоида. При поглощении всей запасенной энергии соленоида "холодной" массой катушки ее равновесная температура в конце процесса не должна превысить 70 К.

К наружной поверхности каркаса приварены алюминиевые трубопроводы

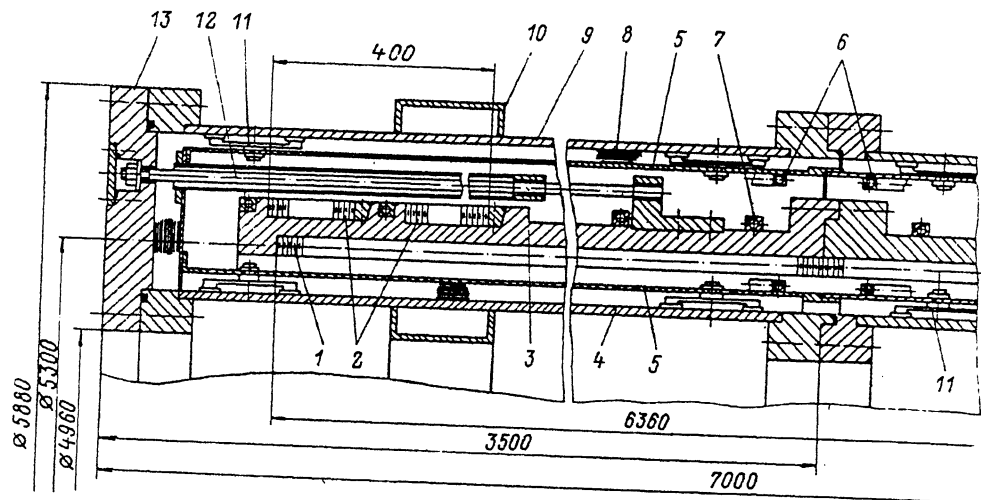


Рис. 5. Конструкция сверхпроводящего соленоида.

Таблица 3

Параметры композитного проводника

Критический ток*	13 кА
Размеры (без изоляции):	
ширина	36 ± 0.25 мм
толщина	4 ± 0.1 мм
радиусы скругления углов	0.5 мм
Толщина витковой изоляции	0.25 мм
Размеры сверхпроводящей вставки (кабеля):	
ширина	7 мм
толщина	1.65 мм
Материал матрицы (стабилизатор)	Al (99.995%)
Величина RRR стабилизатора	750—1000
Сверхпроводник (провод)	СКНТ-0.85
Количество проводов в кабеле	16
Полная длина проводника в обмотках	27.5 км
Масса проводника	13.3 т

*В магнитном поле 2.5 Тл при температуре 5 К.

контуров охлаждения 7, соединенные параллельно двумя коллекторами — верхним и нижним. Эта конструкция охлаждающих контуров позволяет осуществить циркуляционное криостатирование катушки различными методами (например, принудительное под давлением, термосифонное и т. д.). Кроме того, в такой конструкции достаточно просто произвести предварительное захолаживание катушки жидким азотом и ее последующее охлаждение до рабочей температуры 5 К в рефрижераторном режиме работы криогенной гелиевой установки (КГУ).

Катушка окружена охлаждаемыми экранами 5, изготовленными из алюминиевых панелей, снабженных трубчатыми теплообменниками 6. Внешний экран фиксируется относительно каркаса катушки, внутренний — относительно обечайки вакуумного кожуха криостата с помощью опор 11. Рабочая температура экранов 70—80 К обеспечивается циркуляцией газообразного гелия, подаваемого в теплообменники с выхода системы охлаждения катушки. Предусматривается циркуляционное охлаждение экранов жидким азотом при захолаживании соле-

ноида и проведения тестовых испытаний. Дополнительная теплоизоляция обеспечивается многослойной суперизоляцией 8.

Крепление катушки в криостате осуществляется системой растяжек 12 и опор. Растяжки и опоры снабжены тензодатчиками и имеют элементы регулировки, позволяющие юстировать положение катушки. Опоры и растяжки имеют промежуточный тепловой контакт с экраном, что позволяет снизить теплоприток к катушке.

Вакуумный кожух криостата состоит из наружной 9 и внутренней 4 цилиндрических обечайек, усиленных ребрами жесткости 10, и двух кольцевых крышек 13. Обечайки изготавливаются из алюминиевого сплава сваркой листового проката и рассчитаны на устойчивость к атмосферному давлению с учетом осевых сжимающих усилий, обусловленных реакцией системы крепления катушки. В целях удобства изготовления, транспортировки и монтажа обечайки криостата выполняются сборными из двух-трех секций, соединяемых с помощью фланцев.

Торцевые крышки 13 криостата соленоида изготавливаются из нержавеющей стали и являются несущими. Они обеспечивают крепление детектирующей системы, состоящей из ЦТС и жидкоаргонового калориметра, имеющей общую массу порядка 850 т. Внутри магнитопровода — кэтчера криостат установлен на опорах — ложементах, позволяющих выкачивать всю центральную часть установки из магнитопровода в зал обслуживания.

На концах верхней части наружной обечайки криостат имеет два коммуникационных ввода, через которые осуществляется вакуумирование криостата и подвод криогенных, газовых и электросиловых коммуникаций, а также контрольно-измерительных цепей. Наличие двух коммуникационных вводов позволяет избежать криогенных соединений модулей катушки внутри криостата, что существенно упрощает монтаж и повышает надежность соленоида.

Технологические системы соленоида

Системы электропитания, контроля и управления. Обмотки соленоида питаются от двухполярного стабилизированного управляемого источника тока силой 6 кА при напряжении ± 12 В и нестабильности не хуже $5 \cdot 10^{-4}$. Для корректирующих обмоток предусматриваются дополнительные источники тока силой 1 кА при напряжении 6 В и долговременной нестабильности не хуже 10^{-4} с регулировкой, не зависящей от основного источника питания.

Система электропитания включает в себя также источник бесперебойного питания приборов и устройств безопасности и управления, таких как детекторы начала перехода обмоток в нормальное состояние, коммутаторы цепей защиты и эвакуации энергии и т. д.

Автоматизированный контроль и управление технологическим оборудованием осуществляется с помощью персональной ЭВМ, работающей в сети с другими вычислительными средствами установки.

Криогенно-вакуумная система. В основу системы криостатирования СП соленоида положена термосифонная схема охлаждения. В этой схеме процесс термостатирования осуществляется путем естественной конвекции криоагента за счет различия его плотности в подъемных и опускных каналах. Как правило, такая схема включает в себя криогенную рефрижераторную установку, резервуар-накопитель жидкого гелия и объект охлаждения.

Представленная на рис. 6 схема криостатирования соленоида ориентирована на использование унифицированной криогенной гелиевой установки КГУ-500/4.5. Высокая надежность криостатирования в течение длительного времени обеспечивается системой из двух КГУ.

Охлаждение сверхпроводящей катушки и поддержание ее рабочей температуры на уровне 5 К осуществляется путем естественной циркуляции в основном контуре охлаждения 4 жидкого гелия, направляемого из резервуара 7. Для защиты сверхпроводящей катушки от внешних теплопритоков служит система терморадационных экранов 2 с контуром охлаждения 5. Охлаждение экранов

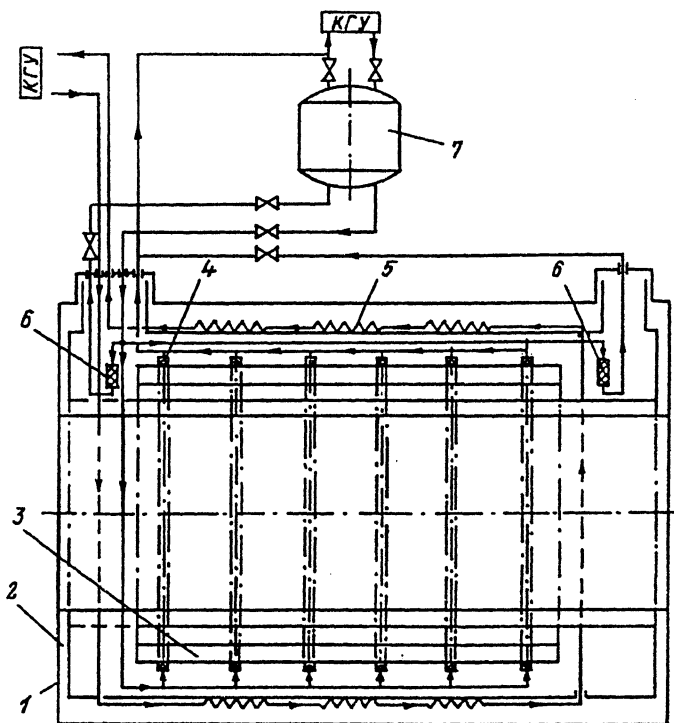


Рис. 6. Схема криостатирования СП соленоида.

1 — криостат соленоида, 2 — система терморрадиационных экранов, 3 — СП соленоид, 4 — контур охлаждения соленоида, 5 — контур охлаждения терморрадиационных экранов, 6 — теплообменники токовых вводов СП соленоида, 7 — резервуар с жидким гелием.

происходит за счет циркуляции газообразного гелия с температурой порядка 70 К, направляемого от КГУ. Охлаждение токовых вводов осуществляется путем отбора части жидкого гелия из контура 4 и ее дальнейшего испарения в теплообменниках 6.

Вакуумная откачка криостата и поддержание необходимого разряжения порядка 10^{-5} Тор осуществляется механическими насосами типа АВЗ-18 и НВЗ-20 и высоковакуумными насосами типа ТМН-800.

Основные эксплуатационные характеристики соленоида. Рабочий цикл соленоида включает в себя подготовительный и пусковой периоды, работу в режиме стационарного поля, а также период остановки.

Подготовительный период включает в себя контроль и тестирование всех систем соленоида, вакуумирование вакуумных объемов криостата, криогенных трубопроводов и емкостей, проведение промывки и продувки трубопроводов и охлаждающих контуров, а также запуск криогенных гелиевых установок и накопление жидкого гелия в буферных и резервных емкостях.

Пусковой период начинается с захолаживания СП соленоида, проводимого в два этапа, и завершается включением источников его питания и подъемом тока в СП катушке до номинального значения. Предварительное охлаждение соленоида до температуры ~ 80 К со скоростью 1.5—2 К/ч осуществляется жидким азотом, циркулирующим в контурах охлаждения СП катушки и экранов. Дальнейшее охлаждение соленоида со средней скоростью 1.5 К/ч производится жидким гелием, поступающим от двух КГУ, работающих параллельно в рефрижераторном режиме.

После достижения рабочей температуры и ее стабилизации во всем объеме катушки стационарная работа соленоида обеспечивается работой одной КГУ в

Основные эксплуатационные характеристики СП соленоида

Продолжительность подготовительного периода	100 – 200 ч
Продолжительность пускового периода	210 – 220 ч
Время охлаждения от 300 К до 80 К	150 ч
Время охлаждения от 80 К до 5 К	50 ч
Время ввода тока	1,5 ч
Продолжительность отогрева	200 ч
Тепловые нагрузки на криогенную систему при температуре 5 К (стационарный режим)	150 Вт
В том числе по соленоиду	80 Вт
и по криотрубопроводам	70 Вт
Тепловыделение от вихревых токов в режиме ввода—вывода тока со скоростью 1 А/с	150 Вт
Суммарная тепловая нагрузка на криогенную систему в динамическом режиме	300 Вт
Потребление криогенных жидкостей:	
при охлаждении соленоида, жидкий азот	35 т
в стационарном режиме, жидкий азот	200 кг/ч
жидкий гелий*	200 л/ч
Потребление электроэнергии в пусковом режиме	1100 кВА
и в стационарном режиме	630 кВА

*В замкнутом цикле без учета технологических потерь КГУ.

ожигительном режиме, при этом ее нагрузка с учетом потерь в криогенных трубопроводах составит около 150 Вт. Динамические изменения тока в катушке соленоида дают дополнительное тепловыделение, обусловленное вихревыми токами в матрице СП проводника и каркасе катушки, что приводит к увеличению тепловой нагрузки на КГУ в режиме ввода—вывода тока до 300 Вт.

Основные эксплуатационные характеристики СП соленоида приведены в табл. 4.

Заключение

В работе описан вариант конструкции сверхпроводящего соленоида, разработанный для экспериментальной установки УКД и коллайдера УНК 3×3 ТэВ. При этом создание всех элементов конструкции соленоида ориентировалось на технологические возможности нашей промышленности и отечественные материалы. Выполненная работа явилась основой для разработки токнесущего элемента соленоида, который в настоящее время находится на стадии испытаний. Следующим этапом могло быть моделирование отдельных технологических систем соленоида и создание его прототипа диаметром 1 м. Из накопленного опыта работы с промышленностью и проектными организациями можно прогнозировать создание подобной системы за 10 лет.

В заключение авторы выражают благодарность С. П. Денисову за постоянное внимание к данной работе и Л. С. Ширшову за предоставленные результаты исследований токнесущей способности сверхпроводящей проволоки. Авторы признательны Л. В. Кечкиной, Л. В. Маркеленковой и Г. В. Романенко за помощь в оформлении рукописи.

Список литературы

- [1] Денисов С. П. // Матер. рабочего совещания по программе экспериментальных исследований на УНК. Серпухов, 1988. С. 343—356. Встречные пучки УНК. Экспериментальная программа. М., 1987. 24 с.
- [2] Holsinder R. F., Iselin Ch. The CERN-POISSON Program Packege (POISCR) User Guide. Geneva, 1983. 67 p.
- [3] Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы / Под ред. В. Р. Карасика. М.: Мир, 1976.

- [4] *Yamada R.* Magnetic Field Calculation on CDF Detector (I). Fermilab Report. N TM-1162. Batavia (Illinois), 1983. 28 p.
- [5] *Fast R. W., Grimson J., Kephart R.* et al. Design Report for an Indirectly Cooled 3-m Diameter Superconducting Solenoid for the Fermilab Collider Detector Facility. Fermilab Report. N TM-1135. Batavia (Illinois), 1982.
- [6] *Minemura H., Mori S., Noguchi M.* et al. // Nucl. Instr. and Meth. 1985. Vol. A238. N 1. P. 18—24.
- [7] ALEPH Collaboration. Technical Report 1983. CERN/LEPC/83-2. Geneva, 1983. P. 2. 1—3. 4.
- [8] DELPHI Collaboration. Technical Proposal. CERN/LEPC/83-3. Geneva, 1983. P. 15—28; DELPHI Collaboration. Progress Report. CERN/LEPC/84-16. Geneva, 1984. P. 13—20.

Институт физики
высоких энергий
Противно Московской обл.

Поступило в Редакцию
9 января 1991 г.
В окончательной редакции
24 мая 1991 г.
