

УДК 530.145

СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА С КРИОКУЛЕРОМ ДЛЯ ИСТОЧНИКА ИОНОВ DECRISS-SC

*Н. Г. Анищенко^а, В. В. Бехтерев^а, С. Л. Богомолов^а,
П. Г. Бондаренко^а, В. Ф. Борейко^а, В. И. Дацков^а, С. Н. Дмитриев^а,
В. М. Дробин^а, А. А. Ефремов^а, Е. В. Иванов^а, И. Е. Карпунина^а,
М. Лепорис^а, Г. Малиновский^б, А. С. Никифоров^а, С. В. Пащенко^а,
Ю. В. Романов^а, В. В. Селезнев^а, Г. П. Цвинева^а, В. Ф. Чумаков^а,
Ю. А. Шишов^а, Н. Ю. Язвицкий^а, Б. И. Яковлев^а*

^аОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна

^бЭлектротехнический институт, Варшава

Сверхпроводящая магнитная система (СПМС) для источника многозарядных ионов DECRISS-SC разработана и создана в Объединенном институте ядерных исследований. Успешные испытания СПМС проведены в конце 2003 — начале 2004 г. Особенности системы обусловлены использованием криокулера мощностью 1 Вт для криостатирования магнита, а также специальной конфигурацией магнитного поля, требуемой для источника ионов.

Четыре обмотки обеспечивают индукцию магнитного поля на оси источника до 3 Тл (пробочное отношение ~ 6), что значительно расширяет возможности ионного источника с точки зрения получения интенсивных пучков высокозарядных ионов. В магните успешно решена задача по компенсации больших сил взаимодействия обмоток с ярмом и реализована надежная подвеска магнита в криостате. Для компаундирования обмоток, работающих в вакууме при косвенном криостатировании, использован препрег (пропитанная эпоксидом горячего отверждения стеклоткань). Применена новая технология защиты сверхпроводящего магнита в аварийных ситуациях с помощью секционирования обмоток, пассивных элементов защиты на холодных диодах и сопротивлениях, а также активной защиты на основе детекторов нормальной зоны и нагревателей.

A superconducting magnet system (SMS) for the multicharged ion source DECRISS-SC was designed and manufactured at the Joint Institute for Nuclear Research. Successful tests of the SMS were conducted in late 2003 — early 2004. The peculiarities of this system are stipulated by using of a cryocooler 1 W in power for the cryostabilization of the magnet, and also by a special configuration of the magnetic field demanded for the source of ions.

Four coils ensure induction of a magnetic field on the axes of the source of up to 3 T (the mirror ratio of ~ 6) which considerably extends possibilities of the ion source from the point of view of producing intense highly charged ion beams. The problem of compensating large forces of interaction between the coils and surrounding iron yoke in this magnet has been successfully solved, and a reliable suspension of the magnet in a cryostat realized. For compounding of the windings working in vacuum at indirect cryostabilization prepreg (fiberglass fabric impregnated with epoxide) is used. There has been applied a new technology of the superconducting magnet protection with the help of sectionalization of the windings, using passive elements of the protection based on «cold» diodes and resistances, as well as a new technology of active protection with normal zone detectors and heaters.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в мировой практике началось широкое применение новых криогенных технологий для сверхпроводящих магнитов. Компактные гелиевые рефрижераторы, новые сверхпроводники и высокоэффективные тепловые экраны позволяют создавать автономные и удобные в эксплуатации сверхпроводящие магниты. В качестве примера реализации данных технологий можно привести созданный в RIKEN (Япония) источник многозарядных ионов RAMSES [1], в котором используются сверхпроводящие соленоидальные обмотки, охлаждаемые с помощью гелиевого рефрижератора.

В настоящее время в ЛЯР ОИЯИ проводится модернизация циклотрона ИЦ-100 [2]. Достаточно высокие требования по заряду и интенсивности ускоряемых пучков (Kr^{15+} , He^{23+}) приводят к необходимости использования ионного источника с повышенным уровнем магнитного поля (до 3 Тл) для стабилизации плазмы при высоких уровнях вводимой СВЧ-мощности. Для создания требуемого распределения аксиального магнитного поля при относительно невысокой потребляемой мощности оптимальным является использование сверхпроводящих катушек.

Магнит с холодной массой 280 кг содержит четыре обмотки с внутренним диаметром 280 мм, с независимым электропитанием токами до 60 А. В обмотках используется провод диаметром 0,65 мм. Обмотки размещены на стальном каркасе. Медный тепловой экран и каркас закреплены в вакуумном кожухе с помощью стеклотекстолитовых опор. Криостатирование осуществляется криокулером Гиффорда–Мак-Магона мощностью 1 Вт при температуре 4,2 К. Холодные массы, в том числе обмотки сухого типа, соединены со второй ступенью криокулера теплопроводами из чистого алюминия. В тоководах используются ВТСП-вставки. Защита магнита осуществляется секционированием обмоток, шунтированием секций холодными диодами и гасительными сопротивлениями (пассивная защита), а также детекторами нормальной зоны и нагревателями обмоток (активная защита). Вакуумный кожух из нержавеющей стали окружен ферромагнитным экраном.

1. КОНСТРУКЦИЯ МАГНИТА

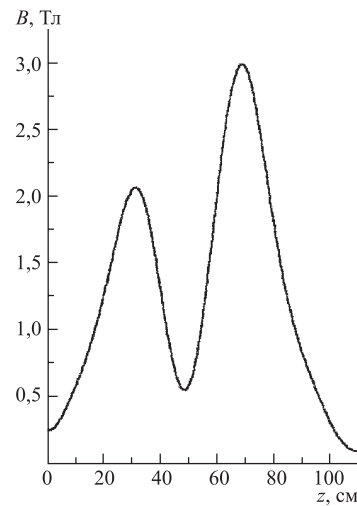
Магнит содержит четыре соосных соленоида, параметры которых даны в табл. 1. Крайние соленоиды включены в цепь электропитания последовательно, внутренние имеют независимое питание, причем центральный соленоид включен в направлении, противоположном остальным. Осевая составляющая магнитного поля образует на оси пучка ионов седлообразную «ловушку» (рис. 1). Конструкция магнита представлена на рис. 2 и 3. Соленоиды 1 (рис. 2) навиты на каркас 2 из нержавеющей немагнитной стали, который укреплен внутри вакуумного кожуха 7 на стеклотекстолитовых опорах 6. Кожух 7 заключен магнитным экраном 8. Каркас с обмотками окружен отражательным алюминиевым экраном 5 и охлаждаемым от первой ступени криокулера 10 медным тепловым экраном 3. На последний уложены маты многослойной экранно-вакуумной изоляции 4. Каркас и обмотки связаны со второй ступенью криокулера ленточными теплопроводами 11 из алюминия высокой чистоты. Кроме того, к каркасу привинчены расположенные вдоль его оси медные пластины-теплопроводы, которые также соединены с головкой

Таблица 1. Основные параметры соленоидов

Наименование	Величины			
	1	2	3	4
Номер соленоида	1	2	3	4
Внутренний диаметр обмотки, мм	281	280	280	281
Внешний диаметр обмотки, мм	397	396	396	350
Длина обмоток, мм	80	81	50	80
Максимальный рабочий ток, А	58,4			
Число ампер-витков, МА	0,549	0,562	0,345	0,318
Количество витков	9409	9619	5901	5439
Плотность тока в обмотке, А/мм ²	118,4	119,6	118,8	115,1
Максимальная индукция на оси, Тл	2,06	3,0	2,8	0,56
Максимальная индукция в обмотке, Тл	4,0	5,0	4,6	2,6
Индуктивность, Гн	33,6	33,6	12,2	11,4
Запасенная энергия, кДж	60,5	60,5	22	20,5
Масса при 4,5 К, кг	~ 280			
Компаундирующий материал	Препрег			

криокулера алюминиевыми полосками. На этих пластинах смонтированы детали электрической защиты сверхпроводящих обмоток — диоды 12 и омические сопротивления 13. Тепловой экран 3 крепится к опорам 6 в средней их части. Шесть токовых вводов 9 расположены вокруг головки криокулера. Предварительная откачка вакуумного кожуха производится форвакуумным и турбомолекулярным 14 насосами (рис. 3). Ускоренное охлаждение до 100 К может быть проведено с помощью охлаждаемого жидким азотом теплообменника 15. Последний соединен с торцами каркаса медными оплетками. Более подробное описание перечисленных узлов представлено в последующих разделах.

Рис. 1. Распределение осевой составляющей магнитного поля вдоль оси магнита



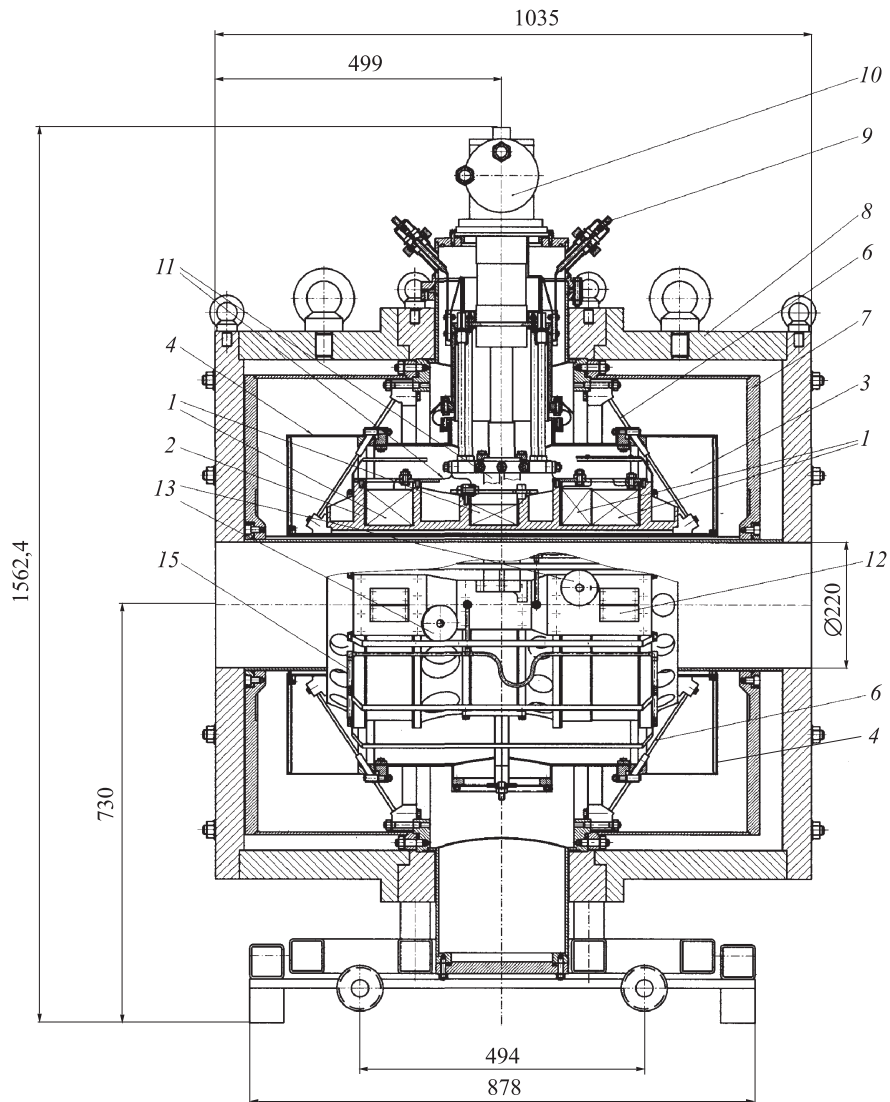


Рис. 2. Общий вид магнита (продольный разрез): 1 — сверхпроводящие соленоиды; 2 — каркас соленоидов; 3 — тепловой экран; 4 — многослойная экранно-вакуумная изоляция; 5 — отражающий алюминиевый экран (см. рис. 3); 6 — опора холодных масс; 7 — вакуумный кожух; 8 — магнитный экран; 9 — тоководы; 10 — криокулер; 11 — теплопроводы; 12 — «холодные» диоды; 13 — гасительные резисторы; 14 — турбомолекулярный насос (см. рис. 3); 15 — азотный теплообменник

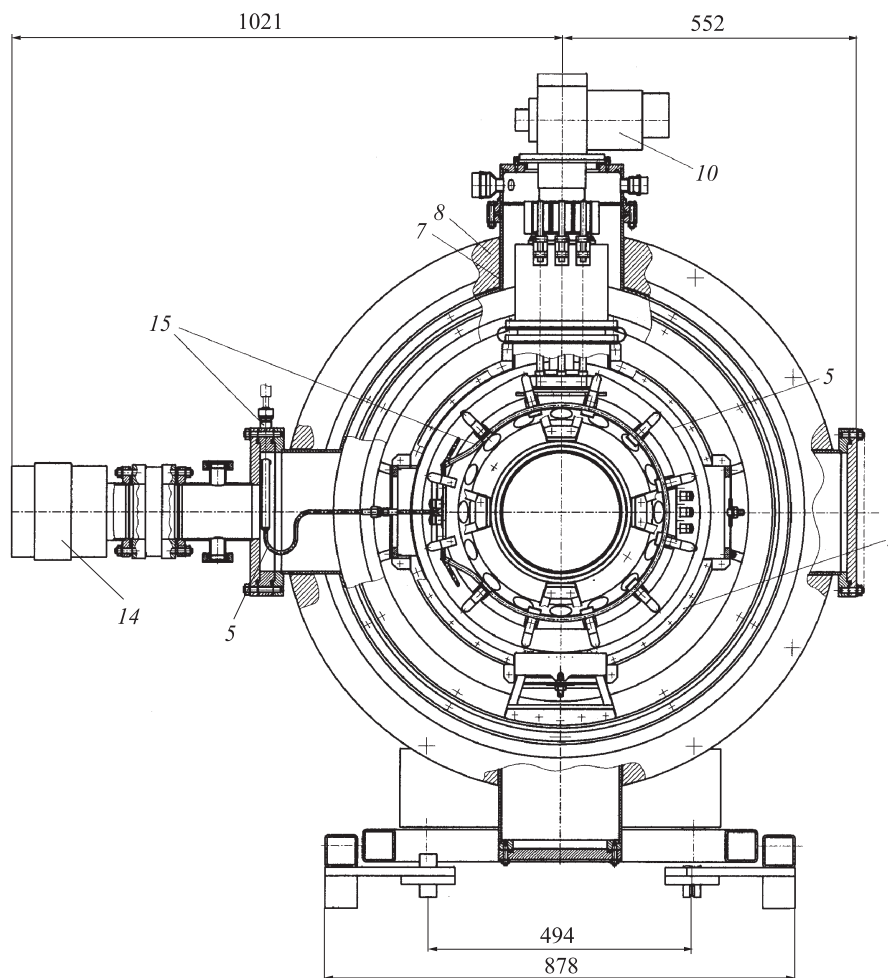


Рис. 3. Общий вид магнита (поперечный разрез). Обозначения — см. рис. 2

2. КРИОКУЛЕР

Криокулер — газовая холодильная машина, состоит из компрессора 1, охлаждающей головки 2 и соединяющих их между собой гибких трубопроводов 3 и электрических кабелей 4 (рис. 4). Некоторые параметры криокулера приведены в табл. 2 [3]. В криокулере осуществляется газовый холодильный цикл Гиффорда–Мак-Магона. Головка криокулера включает в себя клапаны с электроприводом, поршень с теплообменником-регенератором. Теплообменник содержит шарики из редкоземельных металлов, обладающих аномально высокой теплоемкостью при низких температурах. Рабочим телом в цикле является гелий высокой чистоты.

Таблица 2. Криокулер и компрессор [3]

Тип криокулера	Фирма Sumitomo RDK-408D (1 Вт)
Гарантийный срок работы, ч	10000
Тип компрессора	Sumitomo CSW-71 (водяное охлаждение)
Электропитание	Трехфазный ток 50 Гц: 200/380/400/415 В
Мощность, кВт	6,5 (постоянный режим) 7,2 (максимальное значение)
Охлаждающая вода	7 л/мин от 4 до 28 °С
Рабочая температура окружающей среды, °С	от 5 до 28
Размеры компрессора, мм	684 × 500 × 450
Вес компрессора, кг	115
Интервал обслуживания адсорбера в компрессоре, ч	20 000

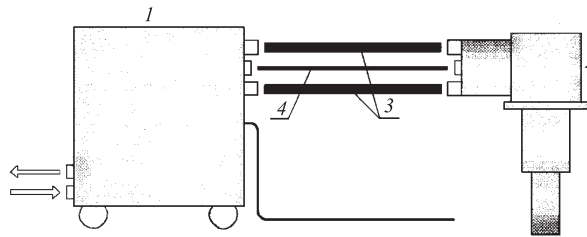
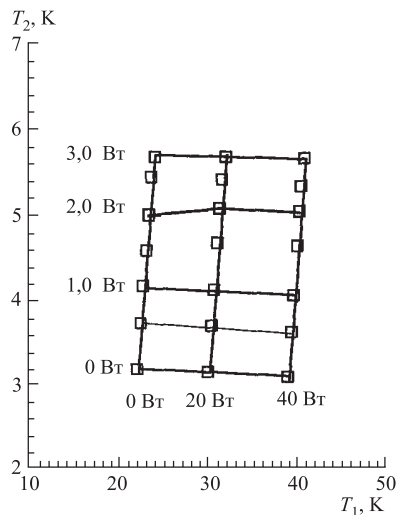


Рис. 4. Криокулер в сборе: 1 — компрессор; 2 — охлаждающая головка; 3 — гелиевые трубопроводы; 4 — электрические кабели

Рис. 5. Кривые зависимости температур 1-й (T_1) и 2-й (T_2) ступеней криокулера от тепловой нагрузки

Криокулер надежен в работе, имеет гарантийный срок эксплуатации пять лет и почти не требует обслуживания. Выпускаемые в настоящее время криокулеры имеют мощность порядка 1 Вт при 4,5 К и позволяют криостатировать магниты с холодной массой порядка 1 т. При этом требуется довольно изошренная теплоизоляция магнита и длительное время для его охлаждения. Разработаны приемы сокращения этого времени с помощью жидкого азота или тепловых ключей. Последние соединяют охлаждаемую массу с первой ступенью криокулера во время снижения температуры от комнатной до ~ 40 К, что позволяет использовать большую мощность первой ступени (например, 30 Вт при 40 К).

Температуры ступеней криокулера связаны с подводимой к ним тепловой нагрузкой (рис. 5 [4]). Мощность ступеней криокулера возрастает при более высоких температурах, что позволяет быстрее охлаждать магниты.

3. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СОЛЕНОИДЫ

Для обмоток использован проводник фирмы OutoKumru (табл. 3). Рабочий ток (60 А) значительно меньше критического значения (более 270 А при 5 Тл, 4,5 К). Запас температурной стабильности в 2,3 К позволяет вести работу магнита при повышенных теплопритоках.

Таблица 3. Параметры сверхпроводящего провода (фирма OutoKumru)

Наименование	Величины
Диаметр провода, мм	0,65
Диаметр провода в изоляции, мм	0,7
Длина провода, км: соленоиды 1/2/3/4/суммарная	10,2/10,2/6,3/5,4/32,1
Критический ток при 4,2 К и 5 Тл, А	≥ 270
Число NbTi-жил	6438
Диаметр жил, мкм	4,7
Шаг скрутки жил, мм	13
Отношение Cu/NbTi	$1,9 \pm 0,1$
$\rho_{300\text{K}} / \rho_{4,2\text{K}}$	> 100
Электрическая прочность изоляции, В	1600
Материал изоляции	Formvar

Компаундирование обмотки осуществлено с помощью препрега (стеклоткань, пропитанная полутвержденной эпоксидной смолой), уложенного между слоями провода и термообработанного после окончания намотки и бандажирования всех соленоидов. Бандаж из нержавеющей проволоки диаметром 0,5 мм предназначен для предотвращения движения внешних витков обмотки под действием электромагнитных сил. Корпусная электроизоляция обмоток состоит из стеклотекстолитовых щечек, тонкого стеклотекстолита и препрега на цилиндрических частях обмотки. С помощью мегомметра на 500 В измерены сопротивления корпусной изоляции обмоток и цепей электропитания и защиты магнита. Они соответственно равны 500 МОм и 50–150 кОм. В принципе изоляция цепей может быть существенно улучшена.

К внешней поверхности обмотки под бандажом приклеены алюминиевые ленты теплопроводов, которые также электрически изолированы от обмотки и бандажа. Каждая обмотка выполнена из одного куска провода, без внутренних спаев, но электрически разделена на две или три секции. К выводам концов секций припаяны провода от цепи «холодных» диодов и гасительных сопротивлений.

Перед намоткой рабочих соленоидов были изготовлены пробные катушки, продольные разрезы которых показали, что слои уложены ровно, витки заполняют впадины предыдущих слоев. Это в принципе полезно для предотвращения движения провода и улучшения теплопроводности обмотки.

4. КАРКАС СОЛЕНОИДОВ

Действующие на обмотки осевые электромагнитные силы имеют своеобразный характер. Средняя катушка, включенная по току в противоположном с остальными направлении, «расталкивает» их с большой силой (~ 60 т). Эти силы растягивают внутреннюю часть каркаса (рис. 6 и 7) и изгибают крайние фланцы. Расчет напряженно-деформированного состояния с помощью программы Visual Nastran Desktop 2001 FEA

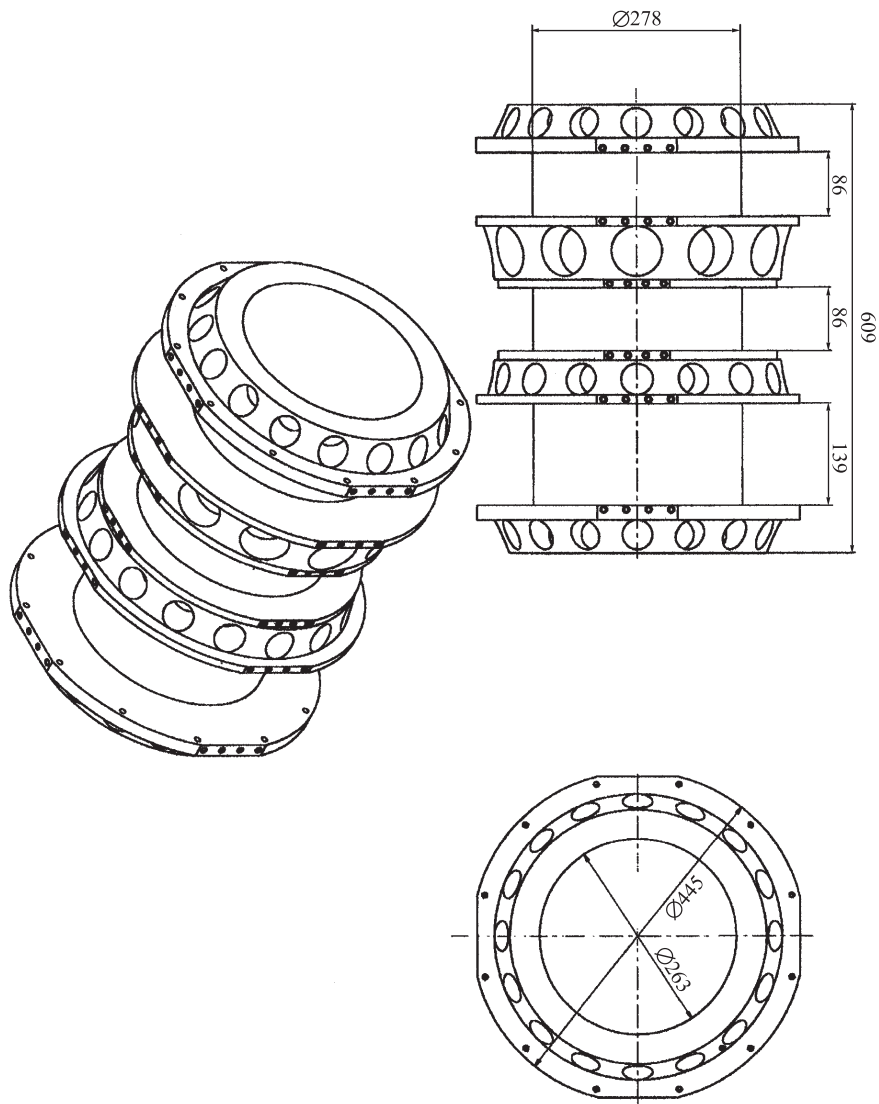


Рис. 6. Каркас соленоидов



Рис. 7. Каркас соленоидов (внешний вид)

показали, что фланцы должны быть толстыми. Поэтому решено сделать концы каркаса коническими. В этом случае изгиб фланцев составляет несколько мкм, что предотвращает трение витков соседних слоев при изменении тока. Такое трение может приводить к явлениям тренировки и деградации критического тока. Остальные фланцы также выполнены массивными. Для уменьшения массы каркаса в утолщениях сделаны выборки.

Каркас выточен из отливки нержавеющей стали марки ОХ18Н5Г12АВ (ННЗБ), магнитная проницаемость $\mu = 1,003$ [5]. Сталь остается немагнитной как при комнатной температуре, так и при многократном охлаждении до гелиевых температур, а также при механической обработке.

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПИТАНИЕ И ЗАЩИТА МАГНИТА

Обмотки 1 и 2 соединены последовательно и запитываются от одного источника 5 (рис. 8). Обмотки 3 и 4 имеют собственные источники 6, 7.

Защита должна обеспечивать сохранность обмоток и ВТСП-вставок 8 при их переходе в нормальное состояние. Систему защиты можно условно разделить на пассивную и активную. Пассивная система защиты достигается секционированием обмоток с шунтированием секций «холодными» диодами CD и гасительными резисторами R. «Холодный» диод открывается при ~ 7 В и замыкается на секцию через сопротивление 1 Ом. Указанная защита предотвращает локальные чрезмерные нагревы обмоток и температурные деформации, а также пробой электрической изоляции. В некоторой степени обмотки самозащищены, так как имеют небольшие размеры поперечного сечения и достаточную теплопроводность.

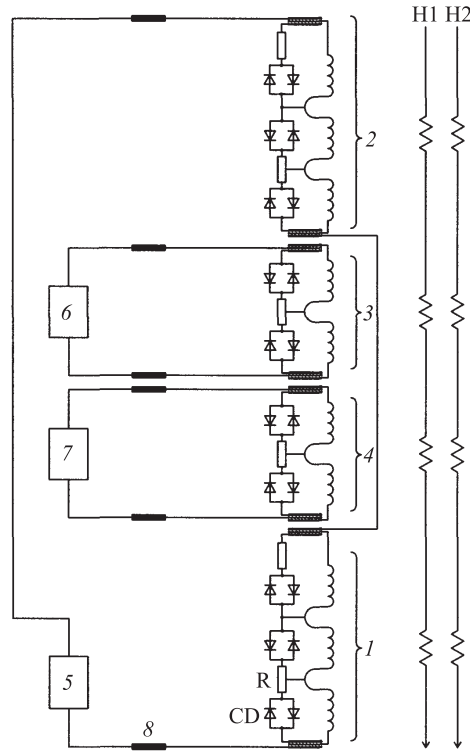


Рис. 8. Электрическая схема питания и защиты соленоидов: 1, 2, 3, 4 — обмотки; 5, 6, 7 — источники питания; 8 — ВТСП-вставка; H1, H2 — нагреватели обмоток; CD — «холодные» диоды; R — гасительные резисторы

Активная система содержит три детектора нормальной зоны (ДНЗ) и установленные на обмотках восемь резистивных нагревателей H1 и H2. Нагреватели разбиты на две группы — основную и запасную, каждая из которых снабжена собственным источником питания. Нагреватели контактируют с обмотками по-разному: два из них наклеены непосредственно на внешнюю цилиндрическую поверхность обмотки под бандажом, два приклеены к выходящим из обмоток алюминиевым теплопроводам, остальные наклеены на бандаж. Нагреватели обеспечивают одновременный нагрев всех обмоток, что позволяет избежать возникновения чрезмерной силы притяжения каркаса с обмотками к магнитопроводу. Такая сила может превышать величину в несколько тонн и привести к поломке опор для «холодной» массы.

Для предотвращения ложных срабатываний детекторов нормальной зоны установлены шунтирующие омические сопротивления на токовых выводах из магнита и концах мостовой схемы детекторов. Последующие испытания магнита показали, что эти меры позволили устранить случайные срабатывания детекторов, не связанные с переходом обмоток в нормальное состояние.

Блок-схема системы питания одной обмотки магнита и защиты с помощью ДНЗ представлена на рис. 9. Блок управления и индикации 3 фиксирует приходящие сигналы с

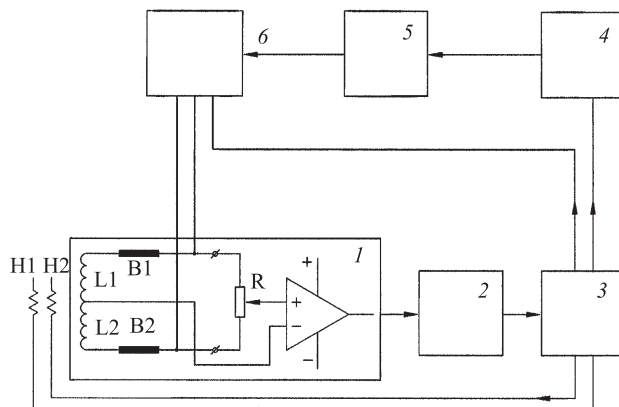


Рис. 9. Электрическая схема защиты одной обмотки магнита: 1 — детектор нормальной зоны; 2 — амплитудно-временной анализатор; 3 — блок управления и индикации; 4 — персональный компьютер (ПК); 5 — программатор источника тока обмотки; 6 — источник тока обмотки

ДНЗ 1, запоминает их и формирует выходные сигналы для управления исполнительными устройствами. Чувствительным элементом ДНЗ является мостовой датчик напряжения, образованный половинками обмотки L1 и L2, VTСП-вставками B1 и B2 и внешним резисторным делителем R. Подстройкой делителя R осуществляется балансировка мостовой схемы во время ввода-вывода тока в обмотку с постоянной скоростью. Сигнал разбалансировки с диагонали моста поступает на вход дифференциального усилителя и далее на амплитудно-временной анализатор 2. Последний осуществляет «отсев» ложных сигналов с амплитудой менее 1 В и длительностью менее 10 мкс. При появлении нормальной зоны в одной из половинок обмотки или на VTСП-вставке сигнал разбаланса ДНЗ запускает через исполнительные устройства источники нагревателей H1 и H2, отключает источник тока 6 обмотки и выдает дублирующий сигнал на персональный компьютер (ПК) 4 на отключение этого источника тока через программатор 5.

6. ТОКОВВОДЫ

Токоввод фирмы CAN, Чехия, [6] состоит из медной оплетки 1 и VTСП-вставки 4 (рис. 10). Соотношение длины и площади поперечного сечения оплеток подобрано оптимальным для получения минимального теплопритока в холодную зону (табл. 4) [7]. Для снятия этого теплопритока имеется тепловой «якорь» 3. Он состоит из фольгированного диэлектрика, припаянного одной стороной к медному цилиндру, который с помощью болтов соединен (через промежуточные медные детали) с первой ступенью криокулера 7. К другой стороне диэлектрика припаяны медная пластинка и холодный конец оплетки токоввода. Такой «якорь» позволяет получить на ближайшем конце VTСП-вставки температуру значительно ниже 70 К. Между «якорем» и VTСП-вставкой имеется короткий гибкий участок оплетки, необходимый для компенсации различий в температурной деформации сопряженных деталей. Верхняя часть оплетки впаяна во втулку с керамическим

изолятором 2. Эта деталь уплотнена витоновой прокладкой в головке вакуумного кожуха. Вставка из ВТСП-керамики имеет на концах серебряное покрытие. На один конец надета и припаяна упомянутая оплетка, второй конец вставлен в медную чашечку. На этот конец трубки навит сверхпроводящий провод 6 диаметром 0,65 мм. Чашечка заполняется припоем. Дно чашечки припаяно к «якорю» 5 из фольгированного диэлектрика, который, в свою очередь, припаян к медному фланцу, привинченному ко второй ступени криокулера 8. Провод 6 затем спаивается с проводом, идущим от соответствующей обмотки.

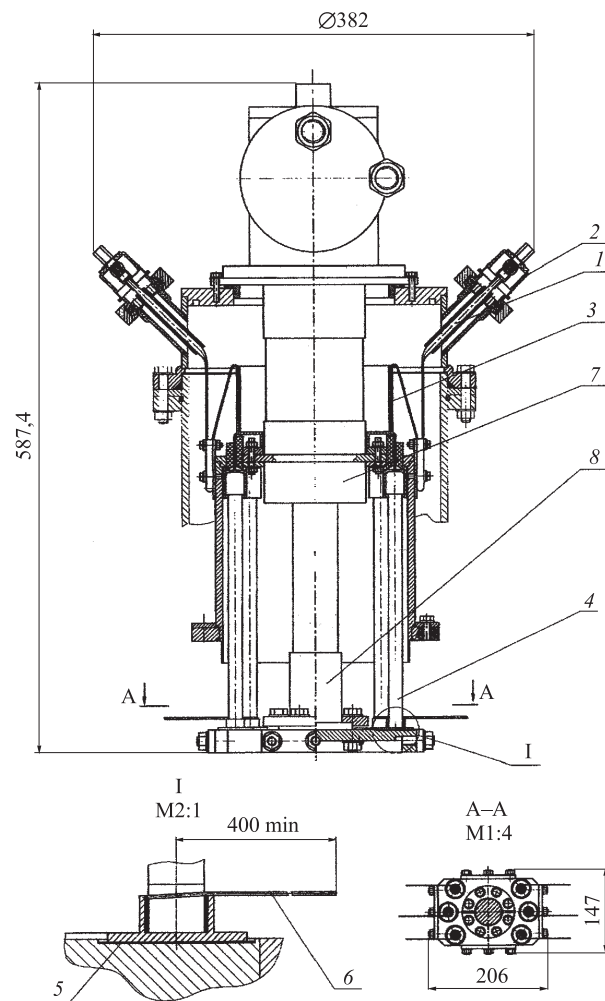


Рис. 10. Токовводы: 1 — медная оплетка токоввода; 2 — керамический изолятор; 3 — тепловой «якорь» (40 К); 4 — керамическая ВТСП-вставка; 5 — тепловой «якорь» (4,5 К); 6 — компенсационная петля NbTi-провода; 7, 8 — 1-я и 2-я ступени криокулера соответственно

Таблица 4. Характеристика тоководов

Наименование	Величина
Диапазон 300–40 К:	
Материал — медная оплетка	
$\rho_{300\text{K}}/\rho_{4,2\text{K}}$	≥ 100
Длина, мм	300
Площадь поперечного сечения, мм ²	4,4
Плотность тока (при 60 А), А/мм ²	13,6
Теплоприток по одному вводу, Вт	2,37
Диапазон 40–4,2 К:	
Материал — Bi-2223*	
Длина, мм	220
Размеры поперечного сечения, мм	$\varnothing 12 \times 1$
Критический ток, А	250
Теплоприток по одному вводу, мВт	15
Допустимый рабочий ток при 40К и 0,5 Тл, А	> 100

*Производство CAN, Чехия [6].

7. ТЕПЛОВОЙ ЭКРАН

Медный тепловой экран 3 изготовлен с помощью сварки полированных листов и фланцев и охлаждается через механический контакт первой ступенью криокулера (рис. 2). Для удобства сборки магнита экран состоит из нескольких частей, соединенных с помощью болтов (рис. 11). Связанная с криокулером вертикальная часть экрана соединяется с обечайками 1, окружающими обмотку, с помощью компенсатора температурных усадок. Компенсатор выполнен из полос алюминия высокой чистоты. Все обечайки имеют разрез, препятствующий возникновению вихревых токов при переходе обмоток из сверхпроводящего в нормальное состояние. Взаимодействие таких токов с магнитным полем привело бы к появлению электромагнитных сил, под действием которых обечайки могли бы потерять форму. Края разрезов скреплены накладками 2 из стеклотекстолита. На обечайках укреплены восемь стальных креплений 3, которые фиксируются на опорах «холодных» масс и центрируют экран, передавая его вес на опоры.

8. ОПОРА ДЛЯ ХОЛОДНЫХ МАСС

Каркас с обмотками укреплен в вакуумном кожухе с помощью двух узлов опор (рис. 12). Узлы содержат стеклотекстолитовые планки 1, стальные кольца 2 и медные тепловые «якоря» 3. Последние соединены гибкими медными жгутами с тепловым экраном. К этим «якорям» подвешивается медный тепловой экран.

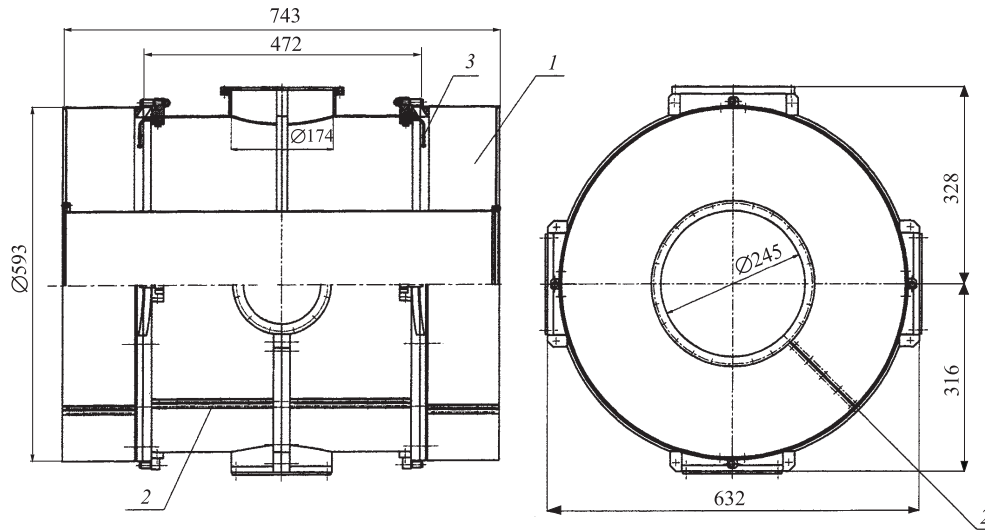


Рис. 11. Тепловой экран: 1 — медные обечайки; 2 — стеклотекстолитовые накладки на разрезы обечайек; 3 — узлы крепления экрана к опорам

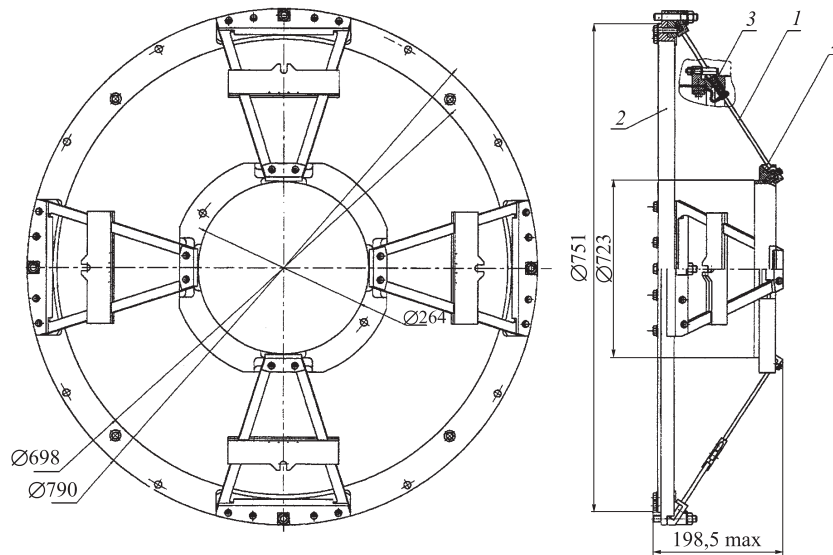


Рис. 12. Опора для холодных масс: 1 — планки из стеклотекстолита; 2 — кольца из нержавеющей стали; 3 — медный тепловой «якорь»

Опоры должны выдержать не только вес холодных масс, но и значительные осевые динамические усилия, которые могут иметь место при неравномерных переходах обмоток в нормальное состояние. Оценочные расчеты показали, что при этом возникают силы притяжения обмоток к магнитному экрану порядка 1 т.

Изготовлена и испытана экспериментальная опора. Проведены механические испытания опор в сборе, при которых нагрузка создавалась с помощью винтового домкрата, а измерения сил велись с помощью динамометра. Максимальная растягивающая осевая нагрузка составила 1,6 т, при этом осевое перемещение кольца опоры — 1,76 мм. Радиальная нагрузка на малое кольцо составила 0,53 т, перемещение 2,4 мм. Остаточные деформации при сбросе нагрузок были незначительны. Опора также нагружалась осевой силой 3,18 т, при этом появились остаточные деформации 0,4 мм.

Обе опоры установлены соосно, так что возможно проскальзывание каркаса в кольцах опор.

Углы наклона стеклотекстолитовых пластин по отношению к оси каркаса подобраны так, чтобы при охлаждении в них не возникали чрезмерные напряжения. Это подтверждено расчетом с помощью программы TOSCA напряженно-деформированного состояния опор, учитывающего все нагрузки и температурные деформации опор и каркаса. Такие же расчеты проведены для сравнения с результатами испытаний экспериментальной опоры. Совпадение соответствующих величин было вполне достаточным.

Рабочие опоры также проверены на прочность осевым усилием 1,27 т и радиальным усилием 0,32 т.

9. КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ

Управление источниками электропитания обмоток, а также контроль за состоянием всей СПМС осуществляется с помощью ПК. Ввод и вывод тока в обмотки осуществляется со скоростью от 0,005 до 0,015 А/с. В холодной зоне магнита размещены 16 датчиков температуры (рис. 13), основная часть которых предназначена для анализа работы узлов в период испытаний магнита. Для постоянного контроля во время эксплуатации можно ограничиться 5–6 датчиками.

В качестве термометров использованы отобранные и калиброванные резисторы ТВО [8]. Термометры калиброваны в интервале температур 4–300 К с точностью 0,5%. Калибровочная нелинейная функция аппроксимирована с помощью полинома вида

$$T = K_1 + K_2(1000/R)^1 + \dots + K_n(1000/R)^{n-1},$$

где $K_{1,2,\dots,n}$ — коэффициенты полинома; n — степень полинома; R — измеряемое сопротивление. Монтаж термометров осуществляется с использованием теплопроводной смазки и теплопроводов. Последние выполнены из фольгированной полиимидной пленки. Подводы к датчикам изготовлены из скрученных манганиновых проводов. Измерение сопротивления термометров производится по четырехпроводной схеме на постоянном токе 10 мкА. Все термометры включены последовательно. Сигналы с термометров через коммутатор, усилитель и АЦП поступают на ПК, где преобразуются в показания температуры.

Режим опроса термометров — каждые 15 с. При этом осуществляется запись показаний в память для последующего воспроизведения и анализа.

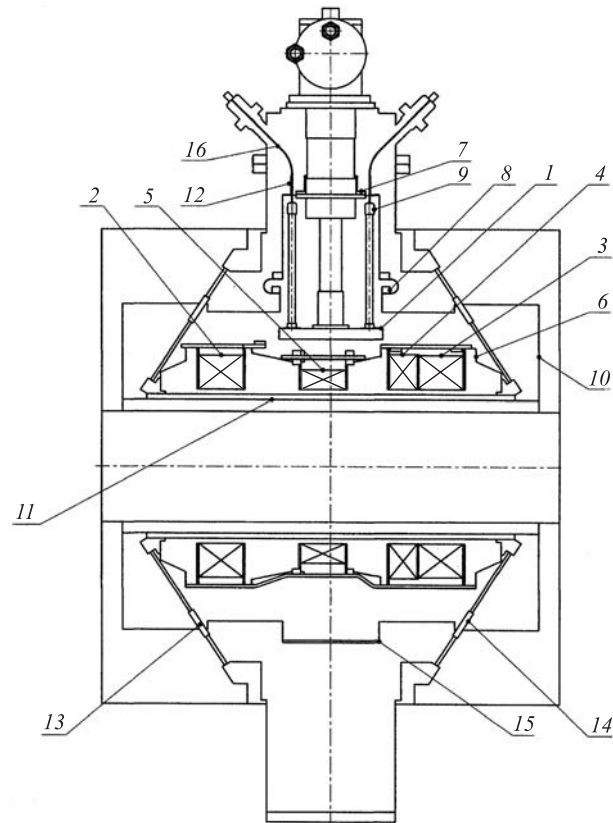


Рис. 13. Расположение термометров и их показания в одном из сеансов испытаний магнита при токе 45 А: 1 — 2,7–2,8 К; 2 — 3,99 К; 3 — 3,55 К; 4 — 3,68 К; 5 — 3,89 К; 6 — 4,37 К; 7 — 39,46; 8 — 48,82 К; 9 — 41,89 К; 10 — 59,34 К; 11 — 59,71 К; 12 — 43,39 К; 13 — 60,37 К; 14 — 58,40 К; 15 — 57,79 К; 16 — 144,58 К

Показания датчиков в одном из сеансов испытаний магнита представлены в подписи к рис. 13.

Кроме показаний термометров, на стадии испытаний магнита контролировалось сопротивление ВТСП-вставок токовводов.

С целью защиты магнита при возникновении неисправностей предусмотрены следующие сигналы блокировки в системе управления:

— при повышении температур датчиков T1–T5 до 5,5 К на экран монитора выводится сигнал о предаварийной ситуации.

— при срабатывании ДНЗ осуществляется отключение источников питания и включение нагревателей для перевода всех обмоток в нормальное состояние.

При прекращении подачи охлаждающей воды в компрессор криокулера компьютер дает сигнал на остановку компрессора.

Компрессор имеет собственную блокировку на отсутствие воды и превышение допустимой температуры воды.

10. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАГНИТА ЖИДКИМ АЗОТОМ

Для ускоренного охлаждения магнита до 100–120 К можно применять жидкий азот. При расчете этого устройства следует учесть, что во избежание возникновения внутренних напряжений в обмотке скорость понижения температуры должна быть ограничена величиной 10–20 К/ч.

В рассматриваемом магните устройство состоит из теплообменника, дьюара с жидким азотом, электрического испарителя азота и регулятора давления, а также трубопроводов для подачи и отвода азота. Теплообменник представляет собой две медные трубки, прикрепленные через медные жгуты к торцам каркаса обмоток. Азот подводится к этим трубкам по тонкостенным нержавеющей трубкам, которые имеют контакты с тепловым экраном. Это обеспечивает минимизацию теплопритока к каркасу в рабочих условиях.

11. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Основными целями испытаний являлись проверка работоспособности узлов и магнитной системы в целом. Кроме того, с помощью многочисленных датчиков температуры прослеживалась достаточность тепловых связей в процессах охлаждения и отепления.

Период охлаждения магнита с использованием жидкого азота составил примерно 120 ч. Анализ динамики температур T1–T6 показывает, что скорость охлаждения можно увеличить, установив теплопроводы между азотным теплообменником и обмотками, а также дополнительные теплопроводы между второй ступенью криокулера и обмотками.

Обращает на себя внимание, что температуры T1–T6 ниже 4 К (рис. 13), что доказывает наличие резервной мощности второй ступени криокулера. Путем включения нагревателей и установления стационарных температур T2–T6 около 4,2–4,3 К величина этой мощности определена как 0,5 Вт.

В обмотках нет короткозамкнутых витков, что подтверждено измерением магнитного поля на оси соленоидов с вводом и выводом тока.

Распределение магнитного поля вдоль оси обмоток в достаточной степени близко к расчетному значению, что показано измерениями с помощью датчика Холла.

В обмотки 3 и 4 вводились токи 60 А.

Во время наладки системы защиты при токе во всех обмотках 42 А произошло незапланированное срабатывание ДНЗ. В результате автоматически включились нагреватели и выключились источники питания, обмотки нагрелись до 20–40 К. После охлаждения до рабочей температуры и дополнительной наладки устройств защиты вводился ток во все обмотки одновременно вплоть до 45 А. При вводе тока в обмотках наблюдалось повышение температуры на 0,1–0,2 К. Никаких отклонений от нормальной работы магнита не было замечено, что позволяет сделать вывод об исправной работе магнитной системы.

ВЫВОДЫ

1. Вакуумная система магнита работает надежно, герметичность высокая — давление составляет несколько единиц 10^{-6} Па.

2. Совокупные теплопритоки близки к расчетным величинам. Суммарный теплоприток составляет примерно 0,5 Вт, при этом температуры обмоток и токовводов оптимальны.

3. Решена задача по гибкой тепловой связи магнитных элементов со второй ступенью криокулера с помощью лент из чистого алюминия. Тепловые контакты и теплопроводы имеют достаточную теплопроводность, однако возможно их дальнейшее усовершенствование.

4. Успешно решена задача по компенсации сил в катушках и реализована надежная подвеска магнитной системы.

5. Реализована пассивная защита (секционирование, диоды, сопротивления) и активная защита с детектором нормальной зоны и нагревателями обмоток.

Благодарности. Авторы настоящей работы выражают глубокую благодарность В. Хмельовскому, А. Хрынкевичу и Т. Яновскому за внимание и постоянную поддержку работ по развитию нового направления техники сверхпроводящих магнитов, охлаждаемых с помощью криокулеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nagagawa T. *et al.* // Proc. of the 16th Intern. Conf. on the Cyclotron and Their Applications, East Lansing, Michigan, USA, 2001. AIP Conf. Proc., N. Y., 2002. V. 600. P. 232.
2. Гикал Б. Н. и др. Модернизация циклического имплантатора ИЦ-100. Препринт ОИЯИ Р9-2003-121. Дубна, 2003.
3. Oxford Instruments (UK) Ltd. 1999; E-mail: info.ri@oxinst.co.uk
<http://www.oxford-instruments.com>
4. Shibutani K. *et al.* Development of two types of cryogen free superconducting magnets // Adv. Cryog. Eng. 1998. V. 43. P. 299–305.
5. Сталь с пониженным содержанием никеля: Справ. / Под ред. М. В. Приданцева и Г. Л. Лившица. М., 1961.
6. CAN Superconductors Ltd. Praha, 1999; <http://www.can.cz>
7. Глебов И. А., Шахтарин В. Н., Антонов Ю. Ф. Проблемы ввода тока в сверхпроводниковые устройства. Л., 1985. С. 47–50.
8. Datskov V. I., Weisend J. G. II. Characteristics of Russian carbon resistance (TVO) cryogenic thermometers // Proc. of ICEC15, Genova, Italy, 1994. P. 425–428.

Получено 28 октября 2004 г.