

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ГАЗОНАПОЛНЕННОГО СЕПАРАТОРА GASSOL ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Е. К. Кошурников^{1,*}, *К. Б. Гикал*², *Г. Г. Гульбекян*²,
*С. Кунео*¹, *В. Ю. Охрименко*¹, *Д. И. Соловьев*², *Д. Торацца*¹

¹ ООО «Нева-Магнит», Санкт-Петербург, Россия

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Магнитный газонаполненный сепаратор GASSOL — новая экспериментальная установка, разрабатываемая в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований для эффективного изучения химических свойств короткоживущих сверхтяжелых элементов. Одним из основных компонентов этой установки является сверхпроводящий магнит массой около 20 т, предназначенный для создания аксиально-симметричного магнитного поля. Приводится описание конструкции, технологии изготовления и сборки магнита, а также результаты механических, электромагнитных и тепловых расчетов в обоснование его конструкции. Максимальное расчетное магнитное поле в апертуре ионопровода сепаратора диаметром 273 мм составляет 7,6 Тл.

GASSOL magnetic gas-filled separator is a new experimental setup being developed at the Laboratory of Nuclear Reactions of the Joint Institute for Nuclear Research. It is intended for the effective study of chemical properties of short-lived superheavy elements. One of the main components of this facility is the superconducting solenoid magnet weighing about 20t, designed to create an axially symmetric magnetic field. The paper provides a description of the design, manufacturing technology and assembly of the magnet, as well as the results of mechanical, electromagnetic and thermal calculations to justify its design. The design magnetic field in the aperture of the separator ion chamber with a diameter of 273 mm is 7.6 T.

PACS: 25.70.–z; 25.70.Jj; 27.90.+b

ВВЕДЕНИЕ

Магнитный газонаполненный сепаратор GASSOL выполняет функцию ионно-оптической двояковыпуклой линзы, которая фокусирует сверхтяжелые элементы (СТЭ) [1], синтезированные в реакции горячего слияния ^{48}Ca с трансактинидными мишенями от U до Cf [2]. Траектории СТЭ, выходящие из точки на оси пучка и проходящие через апертуру магнита, фокусируются в области рабочей поверхности детектора на оси

* E-mail: root@magnet.spb.su

пучка на другой стороне магнита. Первичный пучок фокусируется и перехватывается стоппером в промежуточной точке на оси магнита [3]. Основной задачей создаваемой установки является изучение химических свойств СТЭ. Из-за большого заряда ядра скорость электронов на внутренних оболочках приближается к скорости света, что приводит к релятивистскому увеличению массы электронов и изменению структуры электронных оболочек, что, в свою очередь, может привести к значительному отличию в химических свойствах СТЭ при сравнении с ближайшими более легкими гомологами [4].

Концептуальная схема магнитного сепаратора SHE сверхтяжелых элементов GASSOL показана на рис. 1. Согласно данной схеме сверхпроводящий соленоид окружен железным магнитопроводом, позволяющим усилить магнитное поле в апертуре соленоида в области его взаимодействия с пролетными ионами и ослабить его снаружи магнитопровода в областях размещения мишени и детектора.

Для охлаждения сверхпроводящей обмотки магнита предусмотрено использование системы охлаждения магнита cryogen-free, что означает отказ от использования жидких криоагентов в системе охлаждения.

В соответствии с практикой планирования экспериментальных работ на циклотронных пучках в Лаборатории ядерных реакций (ЛЯР) установка GASSOL должна работать в среднем 1500 ч в год. С учетом подготовительно-заключительного периода продолжительность нахождения магнитной системы в холодном состоянии в течение года составит около 3000 ч. Остальное время в течение года магнит будет находиться в нерабочем состоянии и отепляться до комнатной температуры. Планируемый срок службы магнитной системы — 10 лет. Общее время нахождения магнита в холодном состоянии за это время должно составить 30 000 ч.

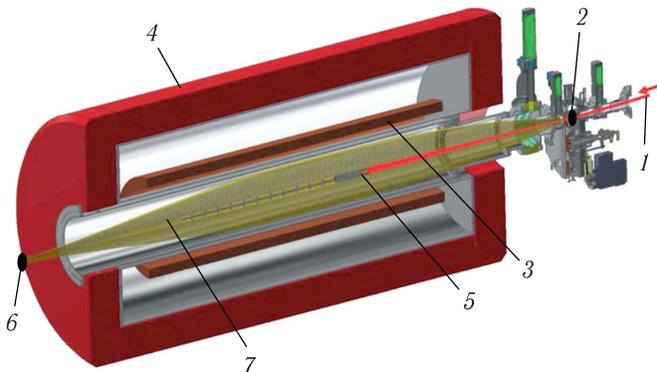


Рис. 1. Концептуальная схема магнитного сепаратора SHE: 1 — первичный пучок; 2 — вращающаяся мишень; 3 — сверхпроводящая катушка; 4 — магнитопровод; 5 — стоппер пучка (3 кВт); 6 — детектор; 7 — траектории фокусируемых ионов, синтезированных в реакции горячего слияния ^{48}Ca с трансактинидными мишенями

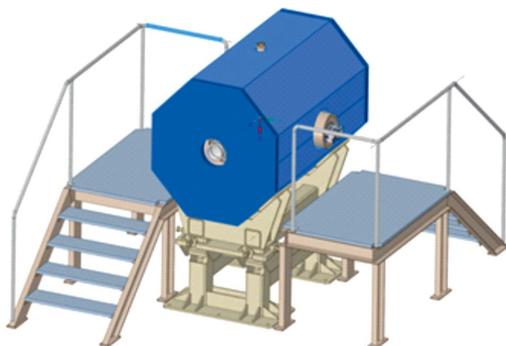


Рис. 2. Общий вид магнитной системы

В июне 2022 г. был закончен технический проект магнитной системы [5]. Общий вид магнитной системы показан на рис.2. Магнитопровод, внутри которого расположен криостат со сверхпроводящей катушкой, установлен на регулируемой подставке. Для обслуживания горизонтально расположенных криокулеров используются две сервисные платформы.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СЕПАРАТОРА

Продольный разрез магнита приведен на рис.3, на котором показаны магнитопровод, криостат с расположенной внутри холодной массой, включающей в себя сверхпроводящую катушку и ее опорную кон-

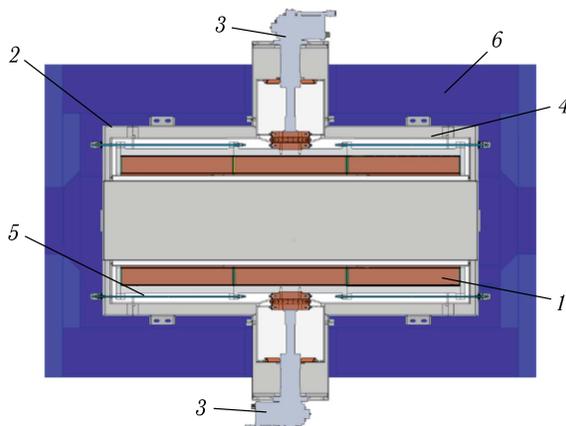


Рис. 3. Продольное сечение магнита (вид сверху): 1 — холодная масса; 2 — вакуумный сосуд; 3 — криокулер; 4 — термический экран; 5 — тяги продольной подвески; 6 — магнитопровод

Таблица 1. Основные характеристики сверхпроводящей катушки и магнитопровода

Параметр	Значение
Сверхпроводящая катушка	
Внутренний радиус катушки по витковой изоляции, м	0,2155
Внешний радиус катушки по витковой изоляции, м	0,28565
Длина катушки по витковой изоляции, м	1,5223
Длина секции катушки по витковой изоляции, м	0,4998
Расчетный ток, А	354
Максимальная индукция в катушке при расчетном токе, Тл	7,6
Ампер-витки при расчетном токе, МА	9,2606
Запасенная энергия при расчетном токе, МДж	5,85
Магнитопровод	
Расстояние между полюсами, м	1,9
Аксиальная длина магнитопровода, м	2,22
Диаметр отверстий в полюсах для ионной камеры, м	0,3
Внутренний диаметр магнитопровода (вписанный), м	0,971
Масса криостата со сверхпроводящей катушкой, кг	2095
Холодная масса, кг	1540
Масса подставки магнита, кг	1815
Масса бочки магнитопровода, кг	13 249
Масса полюсов магнитопровода, кг	2756

струкцию, термический экран, криокулеры, система подвески холодной массы.

Основные размеры, технические характеристики и массы основных узлов магнитной системы GASSOL приведены в табл. 1.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Требования к распределению и величине магнитного поля в рабочей зоне сепаратора определяются магнитооптическими характеристиками магнитной системы. Выбор рабочего диапазона магнитного поля определяется результатами моделирования траекторий через газонаполненный объем соленоида [3]. Зависимость размера изображения от индукции в фокальной плоскости установки показана на рис. 4.

В качестве характеристики размера изображения было выбрано одно стандартное отклонение проекции двумерного гауссиана на одну из осей. Так как расчет основан на экспериментально измеренном заряде отдачи в газе, а точность измерения заряда в худших случаях составляет около 5–10%, то максимальное рабочее значение магнитного поля принимается равным 6,9 Тл, а расчетное номинальное значение соответствует минимальному размеру изображения, достигаемому в поле 5,9 Тл. Магнитная жесткость изучаемых ионов варьируется в зависимости от выбранной реакции, оптимальной энергии пучка ионов и толщины используемой

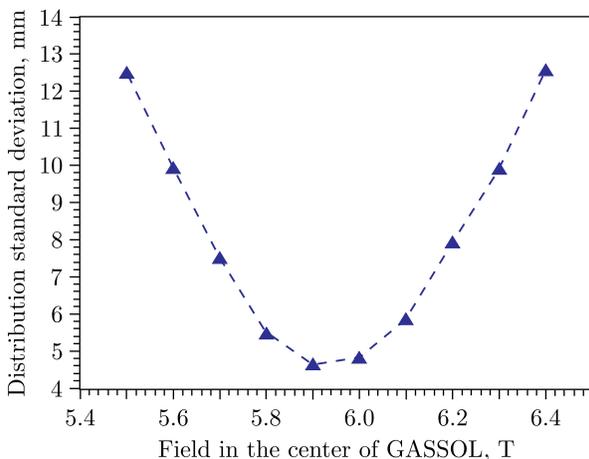


Рис. 4. Зависимость размера изображения СТЭ (^{287}Fl) от индукции в фокальной плоскости

мишени. Таким образом, ожидается, что подстройка магнитного поля будет осуществляться в следующих пределах: $5,9_{-0,6}^{+1,0}$ Тл.

Максимальная индукция в катушке соленоида находится на внутренней поверхности центральной секции, в ее центре, и при расчетном токе $I_d = 354$ А равна $B_{\max} = 7,6$ Тл. Индукция в геометрическом центре магнитной системы при расчетном токе равна 7,5 Тл. Максимальное поле в спинке магнитопровода равно 1,73 Тл. Магнитная индукция поля рассеяния на оси магнитной системы в месте расположения мишени и детектора на расстоянии 0,5 м от торца магнитопровода составляет 4,3 мТл.

Аксиальная электромагнитная сила, действующая на полюс магнитопровода при расчетном токе, составляет $F_z = -295$ кН. Величина радиальной силы, приложенной к балкам бочки магнитопровода, практически одинакова как для балок с отверстием, так и без него и равна 29 кН, что объясняется тем, что магнитное давление в центре балки без отверстия очень мало, а области с максимальным магнитным давлением $1,7 \cdot 10^5$ Па находятся вблизи концов балок, где радиальная составляющая индукции максимальна.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ПРОВОД

В качестве разумного компромисса между необходимостью снижения теплопритоков к холодной массе и обеспечением целостности обмотки за счет вывода из обмотки максимального процента энергии после ее перехода в нормальное состояние был выбран доступный на рынке монолитный

Таблица 2. Параметры NbTi-проводника Luvata

Параметр	Значение
Тип проводника	NbTi-жилы в Cu-матрице
Сечение неизолированного проводника, мм ²	1,44 × 2,2
Радиус скругления углов, мм	0,3
RRR Cu-матрицы	60–65
Cu: поп-Cu	4
Число сверхпроводящих жил	~ 950
Диаметр жил, мкм	~ 30
Шаг твиста, мм	40
J_c (5 Тл @ 4,2 К), А/мм ²	3000
Тип витковой изоляции	PVA
Толщина витковой изоляции, мм	0,035

ниобий-титановый проводник (фирмы Luvata), параметры которого приведены в табл. 2.

ХОЛОДНАЯ МАССА

В состав холодной массы входит сверхпроводящая катушка, разделенная на три секции и размещенная в опорной конструкции, состоящей из трех алюминиевых цилиндров (рис. 5). Катушка разделена на три секции одинаковой длины для улучшения технологичности изготовления и снижения затрат в случае ремонта катушки.

Сборка холодной массы выполнена из двух видов «модулей»:

— боковых модулей, на которых размещены площадки для крепления вертикальных тяг подвески и которые снабжены торцевыми фланцами;

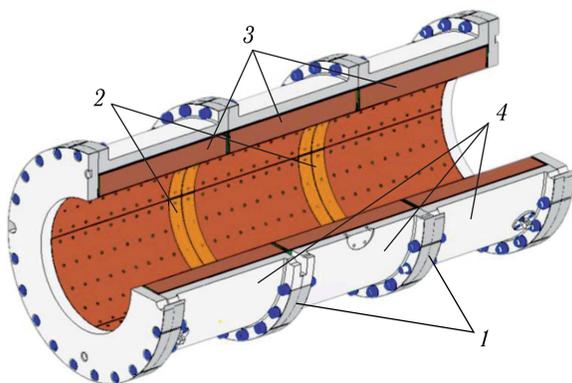


Рис. 5. Холодная масса: 1 — перемычки из чистого алюминия между секциями; 2 — перемычки из меди OFHC между секциями; 3 — секции катушки; 4 — опорная конструкция

— центрального модуля, снабженного площадками, обеспечивающими интерфейс со вторыми ступенями криокулеров, и узлами крепления соединений сверхпроводящего (СП) провода и выводов катушки.

Относительно вакуумного сосуда холодная масса зафиксирована с помощью системы подвески. Механические нагрузки, приложенные к катушке, передаются через систему подвески на вакуумный сосуд, который, в свою очередь, опирается на опорные кронштейны на балках магнитопровода. Регулировка положения сверхпроводящей катушки относительно магнитопровода осуществляется с помощью регулировочных прокладок и болтов, при этом их взаимное положение фиксируется после сборки и выравнивания с помощью штифтов.

Термический экран криостата позволяет снизить тепловые потоки ко вторым ступеням криокулера. В двух патрубках криостата, расположенных в средней горизонтальной плоскости под углом 180° друг к другу, размещаются токовводы, криокулеры и разъемы датчиков.

Модули холодной массы собираются в единое целое с помощью предварительной затяжки алюминиевых болтов М20, изготовленных из Ergal АА 7075-Т6. Изготовление опорных цилиндров и болтов из алюминия позволяет избежать появления дополнительных напряжений в болтах после охлаждения (из-за их разных температурных коэффициентов).

За счет разных температурных коэффициентов алюминиевого опорного цилиндра и материала катушки после охлаждения создается осевое поджатие катушек. Это предотвратит значительное смещение боковых катушек во время ввода тока, которое может вызвать тренировку магнита.

Ограничения в продольной теплопроводности между модулями холодной массы компенсируются тепловыми шунтами с высокой теплопроводностью, приклеенными на наружных радиусах соседних фланцев и между соседними медными листами на внутреннем радиусе секций катушки.

В качестве тепловых шунтов используются полосы из чистого алюминия толщиной 1 мм между фланцами и полосы из меди OFHC толщиной 1 мм между соседними медными секторами секций катушки (см. рис. 5).

Между торцами соседних секций катушки предусмотрена установка прокладок из стеклопластика G10 (общей толщиной 1–2 мм), которые помогут компенсировать допуски по длине намотки.

После намотки и компаундирования катушки должны быть сначала обработаны по внешнему диаметру корпусной изоляции, а затем запрессованы с помощью метода горячей посадки в соответствующие алюминиевые опорные цилиндры. Горячая посадка с натягом порядка 0,3 мм создаст радиальное давление на поверхности катушки, что гарантирует хороший тепловой контакт с алюминиевым цилиндром. При сборке опорные цилиндры можно нагревать максимум до 120°C , чтобы не повредить изоляцию.

Каждая секция катушки будет иметь 40 слоев по 218 витков в каждом. Было выбрано четное количество слоев, чтобы входной и выходной концы находились на одной стороне катушек. Такая компоновка позволяет расположить соединения провода вблизи самых холодных областей холодной массы. По той же причине промежуточные контакты должны быть размещены в конце четных слоев.

Опорные алюминиевые цилиндры катушки должны быть изготовлены из прокатанных цилиндров из алюминиевого сплава АА 6061-Т6, имеющего очень хорошие механические свойства, но плохую свариваемость. По этой причине интерфейсные фланцы составляют единое целое с телом цилиндра, что обеспечивает максимальную надежность конструкции. Центральный опорный цилиндр имеет две круглые, диаметрально расположенные плоские площадки, на которых установлены медные диски с гибкими связями с двумя ступенями криокулеров. Каждый из боковых цилиндров имеет по четыре круглые плоские площадки, на которых установлены точки крепления поперечных тяг.

Межвитковая изоляция обеспечивается лаковым покрытием PVA толщиной 0,035 мм. Межслойная изоляция толщиной 0,25 мм, выполненная из стеклоткани или стеклоленты, намотанной вполнахлеста, предназначена в том числе для облегчения проникновения эпоксидной смолы в тело обмотки при пропитке эпоксидным компаундом. Фланцы из G10 толщиной 5 мм с обеих сторон секций катушки гарантируют электрическую изоляцию, а с одной стороны вмещают промежуточные соединения проводов и входные/выходные терминалы катушки. На внутренних и внешних радиусах секций катушки укладывается корпусная изоляция толщиной 2 мм из стеклоткани или стеклоленты, намотанной вполнахлеста.

Снаружи корпусной изоляции для улучшения теплопередачи и более равномерного распределения температуры устанавливаются листы из меди OFHC толщиной 1 мм, изготовленные в виде отдельных секторов, чтобы ограничить вихревые токи во время переходных процессов. Поверх медных листов на внешнем диаметре секций катушек накладывается дополнительный слой корпусной изоляции из стеклоткани или стеклоленты, намотанной вполнахлеста. Этот слой будет проточен после пропитки для достижения заданного диаметра, что позволит выполнить горячую посадку алюминиевого цилиндра на катушку.

Первоначально перед намоткой секций катушки секторы концевых фланцев из G10, а также секторы концевых фланцев из меди, внутренние пластины медной оболочки и внутренняя корпусная изоляция будут расположены на разборной оправке обмотки, на которую предварительно наносится антиадгезивное покрытие. Корпусная изоляция может быть выполнена либо из тканых полотен из E-стекла, либо путем обертывания тканой лентой из E-стекла вполнахлеста.

Затем сверхпроводящий провод будет намотан с постоянным натяжением. После каждого намотанного слоя будет установлена межслойная изоляция.

Промежуточные соединения катушки будут спаяны, помещены в пазы, сделанные в концевом фланце, и изолированы полиимидной пленкой. В последнюю очередь будут установлены корпусная изоляция, внешние пластины медного покрытия и обрабатываемая корпусная изоляция.

После этого обмотка будет помещена в ванну для пропитки с надлежащим образом защищенными выводными проводниками, направленными вверх, и пропитана эпоксидной смолой в вакууме. После цикла отверждения катушку извлекают из емкости для пропитки и удаляют излишки смолы. Ее внешний диаметр будет обработан на токарном станке таким образом, чтобы она имела необходимый диаметр, соответствующий заданному натягу при горячей посадке внешнего алюминиевого опорного цилиндра. Толщина изоляционного слоя после обработки должна быть в пределах от 1,5 до 3,0 мм.

Общая длина провода в катушке составляет примерно 42 км. Из-за технологических ограничений, налагаемых на длину отдельного куска провода, каждая катушка будет иметь два промежуточных соединения. Поскольку они будут резистивными и, следовательно, выделять тепло, то будут размещены внутри концевых фланцев, изготовленных из G10, рядом с концевыми секторами ОФНС и массивными алюминиевыми фланцами опорных цилиндров. Кроме того, они будут находиться со стороны, близкой к контактным площадкам криокулеров. Соединения длиной не менее 100 мм будут осуществляться пайкой концов по широкой стороне проводников, а затем будут впаяны в медный коробчатый профиль из ОФНС.

Выводные концы катушек будут припаяны к медным стержням из ОФНС и изолированы пропитанной эпоксидной смолой стеклотканью внутри пазов в алюминиевых каркасах для их прохода через них. Ожидается взаимное смещение около 0,06 мм между выводным концом и фланцем после охлаждения холодной массы до 4 К.

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ

Секции катушки, холодная масса и магнит в целом подвергаются следующим воздействиям:

- сила тяжести;
- электромагнитные силы;
- транспортно-погрузочные ускорения;
- термические нагрузки из-за дифференциального теплового расширения.

С учетом установки магнита в г. Дубне Московской обл. (в сейсмически безопасном районе) при анализе прочности конструкции сейсмические ускорения не рассматривались.

Согласно расчетам в рабочем режиме наибольшее среднее эквивалентное напряжение по толщине опорного цилиндра 165 МПа возникает в его центре за счет горячей посадки опорного цилиндра с натягом 0,3 мм, последующего охлаждения до 4 К и приложения магнитных сил. Максимальное эквивалентное напряжение в этом сечении возникает на внутренней поверхности опорного цилиндра и равно 181 МПа. Пиковые напряжения в опорном цилиндре возникают в месте контакта модулей и равны 217 МПа. Наибольший вклад в напряженное состояние опорного цилиндра ($\sim 77\%$) вносит его предварительное нагружение, вызванное температурными напряжениями после его посадки с натягом и последующим охлаждением до температуры 4 К. Эти нагрузки обусловлены общими температурными напряжениями, равными ~ 139 МПа, а остальные общие эквивалентные напряжения ~ 42 МПа — магнитными силами. Суммарные общие механические и температурные напряжения не должны превышать допустимое значение 401 МПа, а напряжения, вызванные только механическими нагрузками (магнитными силами), не должны превышать номинально допустимое значение 111 МПа. Следовательно, условие статической прочности опорного цилиндра сверхпроводящей катушки выполняется.

Наибольшие азимутальные напряжения в сверхпроводящей катушке возникают после посадки опорного цилиндра с натягом и охлаждения до температуры 4 К и составляют 65 МПа. Эти напряжения являются сжимающими. Магнитные силы уменьшают окружные напряжения в витках катушки, так как вызывают в них азимутальные растягивающие напряжения и, следовательно, уменьшают сжимающие напряжения (до ~ 39 МПа). При этом в катушке появляются участки растяжения с напряжениями до 38 МПа.

Напряжения в болтах фланцевых соединений секций достигают своего максимального значения после охлаждения. Пиковые значения расчетных групп напряжений для болтов M20 \times 20 фланцевых соединений модулей приведены в табл. 3, где они сравниваются с допустимыми значениями, рассчитанными с учетом предела текучести материала при рабочей температуре [6].

Таблица 3. Расчетные напряжения в болтах M20

Позиция	$(\sigma)_{mw}$, МПа		$(\sigma)_{zw}$, МПа		$(\sigma)_{4w}$, МПа	
	Величина	Допустимое значение	Величина	Допустимое значение	Величина	Допустимое значение
Центральные фланцы	225	252	337	425*	472	556*
Боковые фланцы	238		316		473	

*Согласно [6] при 4,2 К допускается использование повышенного предела текучести материала болтов Ergal AA 7075-T6, равного 654 МПа.

ОЦЕНКА РАБОТЫ СИЛ ТРЕНИЯ В МОДУЛЯХ СП-КАТУШКИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОЙ СИЛЫ

При сборке между секциями катушки оставляется небольшой зазор. Только после того, как магнитные силы прижимают боковые секции к центральной, протяженность контакта между соседними модулями по радиусу становится почти полной. В случае, если при сборке холодной массы при комнатной температуре между секциями катушки оставляется зазор $\Delta = 1,2$ мм, после охлаждения до 4 К между торцами секций катушки появляется касание на внешнем радиусе. На внутреннем радиусе между ними остается зазор порядка 50 мкм. Одновременно с этим увеличивается усилие в болтах на фланцах с 990 до 1090 кН.

Результаты расчетов смещения точек контактной поверхности опорного цилиндра и катушки под действием аксиальной магнитной силы для боковой секции катушки, а также их относительное перемещение при расчетном токе приведены на рис. 6. Как видно из графика, это взаимное смещение не превышает 25 мкм.

При нарастании тока катушки магнитные силы совершают работу против сил трения между внешними поверхностями секций катушки и внутренними поверхностями алюминиевых опорных цилиндров, которую можно определить по формуле

$$A = 2\pi R\mu \int_0^L P(z)\Delta U(z) dz, \quad (1)$$

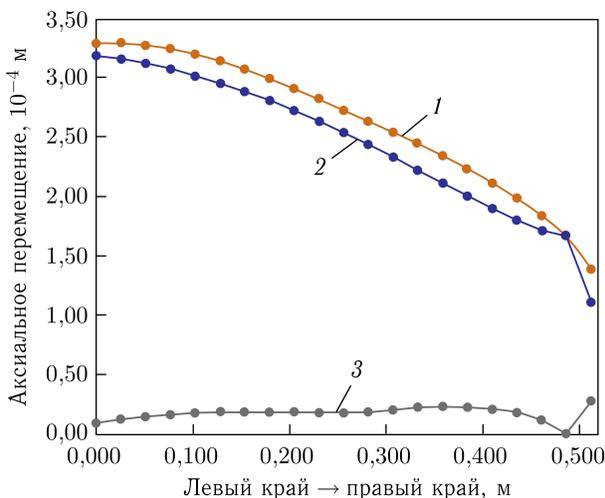


Рис. 6. Смещение точек контактной поверхности опорного цилиндра и катушки под действием магнитной силы: 1 — смещение точек катушки; 2 — смещение точек опорного цилиндра; 3 — взаимное смещение точек, принадлежащих цилиндру и катушке

Таблица 4. Значения работы силы трения против действия магнитных сил

Конструктивный элемент холодной массы	Работа сил трения, Дж
Боковая секция (1 шт.)	39
Центральная секция (1 шт.)	8
Две боковых секции и одна центральная	86

где R — радиус контактной поверхности; $\mu = 0,15$ — коэффициент трения; $P(z)$ — контактное давление; $\Delta U(z)$ — относительное смещение точек, принадлежащих разным сторонам контактной поверхности опорный цилиндр — катушка; z — аксиальная координата; L — длина катушки.

Результаты численного интегрирования выражения (1) представлены в табл. 4.

В боковых секциях катушки совершается большая часть работы против сил трения. Это связано с тем, что осевые магнитные силы больше на краях катушки, там, где больше радиальная составляющая магнитной индукции, ответственная за создание осевой силы. Согласно расчетам суммарные потери на трение в катушке могут быть в пределах 50–100 Дж для различных вариантов затяжки болтов и начальных зазоров между секциями при сборке холодной массы. В зависимости от величины начального зазора между секциями работа сил трения в центральной секции составляет от 3 до 10% от общих потерь на трение в катушке. Для уменьшения работы сил трения необходимо увеличить начальную затяжку болтов фланцевых соединений с одновременным увеличением размеров фланцев и диаметров болтов.

Выделение тепла за счет трения в области сверхпроводящей катушки необходимо оценивать с точки зрения ее возможного перехода в нормальное состояние. Однако согласно расчетам тепло, выделяемое за счет трения только в локальной области на краю секции на наружной поверхности корпусной изоляции (это мажорантная оценка), эффективно рассеивается медными листами, помещенными между алюминиевым опорным цилиндром и катушкой. Максимальная температура наружных витков катушки сначала быстро возрастает в течение первых 2–3 десятых секунды, затем скорость роста уменьшается, и к первой секунде температура катушки достигает максимального значения около 5,5 К. Эта температура ниже критической температуры для сверхпроводящего провода на внешней поверхности катушки, где максимальная индукция меньше 3 Тл при расчетном токе катушки.

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ

С учетом размеров магнита для охлаждения его холодной массы хорошо подходит решение sruogen-free на основе криокулеров, которое имеет множество преимуществ:

— конструкция криостата проще, так как не требуются ни трубопроводы, ни сосуды под давлением, ни предохранительные клапаны. Как следствие, масса магнита меньше, проще его сборка и возможный ремонт, для которого потребовалось бы вскрытие криостата;

— нет необходимости в вентиляционной линии для отвода газов в случае перехода катушки в нормальное состояние;

— к экспериментальному помещению не предъявляются требования по безопасности при работе с криогенными газами;

— не нужна доставка гелия с другой площадки ОИЯИ, которая требует времени, финансовых расходов и трудозатрат;

— не требуется постоянный контроль со стороны оператора, достаточно организовать дистанционный контроль за работой магнита.

С другой стороны, имеется и ряд недостатков:

— криокулеры шумные;

— ограниченная мощность охлаждения требует более длительного времени охлаждения и медленного нарастания тока;

— криокулеры требуют дорогостоящего периодического технического обслуживания.

Тем не менее в данном случае баланс между плюсами и минусами более благоприятен для решения *zero- μ* . Согласно полученным оценкам криокулер Sumitomo RDE 412D4 обеспечивает оптимальную производительность в установившемся режиме работы магнита. Тепловой баланс магнита в установившемся режиме с предварительным расчетом потерь от всех основных тепловыделяющих компонентов приведен в табл. 5.

Первые ступени криокулеров стабилизируются примерно на уровне 43,4 К, что позволяет обеспечивать правильную работу высокотемпературных тоководов HTS-110 CryoSavers, так как при этом остается температурный запас около 20 К и запас по мощности криокулеров около 10 Вт.

Наибольший вклад в тепловой баланс второй ступени вносят защитные шунты для высокотемпературных тоководов HTS-110. Поскольку при расчетной температуре вторых ступеней 4,2 К остается запас в 1,9 Вт по ожидаемой мощности вторых ступеней криокулеров, реальная температура вторых ступеней будет ближе к 4,0 К.

Выполненный расчет переходного теплового баланса для оценки времени охлаждения от комнатной до рабочей температуры с учетом изменения удельной теплоемкости и теплопроводности материалов в зависимости от температуры показал, что для полного охлаждения холодной массы потребуется около 415 ч, при этом термический экран остывает значительно быстрее, примерно за 39 ч, и далее действует как радиационный охладитель по отношению к холодной массе.

В связи с необходимостью компенсировать дифференциальное температурное сжатие и не допускать превышения допустимых усилий, приложенных к стержням криокулеров, связи термического экрана и

Таблица 5. Установившийся тепловой баланс при работе двух криокулеров Sumitomo RDE 412D4

Компонент конструкции	T1, К	T2, К	I, А	P, Вт
Радиационные потери	293	43,4	—	5,8
Токовводы — электрические потери	293	43,4	354	19,5
Токовводы — тепловые потери	293	43,4	—	32,0
Продольные тяги	293	43,4	—	1,9
Поперечные верхние тяги	293	43,4	—	3,6
Поперечные нижние тяги	293	43,4	—	3,6
<i>Всего</i> : бюджет для первой ступени	—	—	—	66,3
Возможности криокулеров	—	—	—	-76,3
Запас по производительности первых ступеней	—	—	—	-10,0
Радиационные потери	43,4	4,2	—	0,04
Токовводы — электрические потери	43,4	4,2	354	0,0
Токовводы — шунты	43,4	4,2	—	0,19
Токовводы — HTS110 (CHS050030)	43,4	4,2	—	0,10
Продольные тяги	43,4	4,2	—	0,05
Поперечные верхние тяги	43,4	4,2	—	0,09
Поперечные нижние тяги	43,4	4,2	—	0,09
Резистивные контакты	—	4,2	354	0,003
<i>Всего</i> : бюджет для вторых ступеней	—	—	—	0,6
Возможности криокулеров	—	—	—	-2,5
Запас по производительности вторых ступеней	—	—	—	-1,9

холодной массы с криокулерами должны быть конструктивно гибкими, при этом термически эффективными.

Согласно рис. 7 первые ступени криокулеров связаны с тепловым экраном с помощью восьми гибких элементов, каждый из которых выполнен в виде пакета из 10 медных пластин OFHC толщиной 0,1 мм, сваренных только по торцам. Такая конструкция должна обеспечить перепад температуры менее 1 К, что является приемлемым для теплового баланса первой ступени.

Тепловые связи двух медных дисков из OFHC (один диск соединен с теплообменной площадкой второй ступени криокулера, другой — с контактной площадкой на алюминиевом опорном цилиндре), выполнены в виде венца из 40 медных жгутов из OFHC с эквивалентным сечением 25 мм² каждый. Такое конструктивное решение должно обеспечить перепад температуры на этом узле приблизительно 0,2 К.

Размеры гибких звеньев для первой и второй ступеней были подобраны таким образом, чтобы компенсировать поперечное смещение на 1 мм при допустимой величине реакции со стороны стержня криокулера.

Конструктивное решение с двумя криокулерами, оси которых расположены в горизонтальной плоскости, позволяет достичь более низких

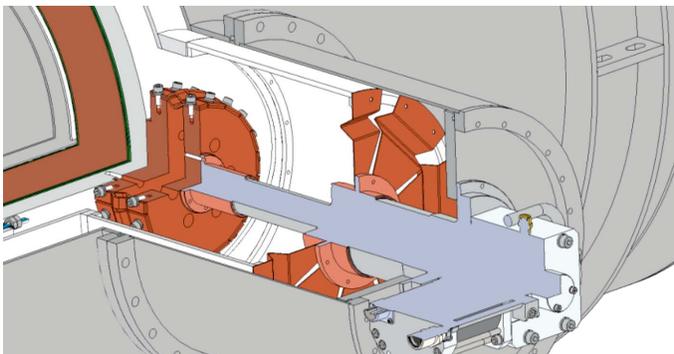


Рис. 7. Гибкие тепловые связи первой и второй ступеней

температур, иметь большой запас по установившемуся тепловому балансу и сократить время охлаждения, а также выровнять распределение температуры как по термическому экрану, так и по холодной массе. Это решение позволяет обеспечить гораздо более легкий доступ для обслуживания криокулеров, несмотря на ограничение по высоте зала в месте установки магнита. По опыту производителя такая ориентация должна снизить холодную мощность криокулера примерно на 2,5 %, что приемлемо в условиях имеющихся у системы запасов. Наличие двух криокулеров позволит поддерживать магнит в холодном состоянии с включением только одного из них в межоперационный период, что позволит сохранить ресурс криокулеров и увеличить интервалы обслуживания, при этом магнит всегда может быть готов к работе в относительно короткие сроки.

Магнитное поле в области отверстий в балках магнитопровода, где расположены криокулеры, достаточно низкое и не превышает 10 мТл. Чувствительные к магнитному полю узлы криокулеров располагаются снаружи магнита, где магнитное поле значительно ниже 50 мТл, что является эксплуатационным пределом, установленным производителем криокулеров.

После анализа теплового баланса в стационарном режиме оказалось, что криокулер с более мощной первой ступенью может дать больший запас по сравнению с моделью с более мощной второй ступенью. Исходя из этого была выбрана модель криокулера Sumitomo RDE 412D4.

КРИОСТАТ

Холодная масса будет изолирована 10 слоями многослойной изоляции. Термический экран, расположенный между вакуумной камерой и холодной массой, будет перехватывать большую часть тепла от наружной стенки криостата и тяг подвески и перенаправлять его на первые ступени криокулеров. Его узлы будут изготовлены из алюминиевых листов

различных марок и разной толщины, чтобы оптимизировать теплопроводность и минимизировать электродинамические силы, возникающие во время переходного процесса после перехода катушки в нормальное состояние. Внешняя поверхность экрана будет покрыта 30 слоями многослойной изоляции. Теплозащитный экран будет опираться на холодную массу через стеклопластиковые проставки, размер которых должен сочетать достаточную прочность конструкции с допустимой утечкой тепла в холодную массу.

При расчетах стационарного поля температур тепловую нагрузку для термического экрана создавали два диаметрально расположенных источника тепла (первые ступени криокулеров) с температурой 44,2 К плюс тепловой радиационный поток на всю наружную поверхность термического экрана 0,904 Вт/м². Согласно результатам расчетов стационарного поля температур в экране максимальная температура принималась (с учетом некоторого запаса) равной 51,5 К. Такое распределение температуры в экране является достаточно однородным и удовлетворительным для правильной работы магнита.

После перехода катушки в нормальное состояние на термический экран, изготовленный из проводящего материала, действуют электродинамические силы, возникающие за счет взаимодействия магнитного поля сверхпроводящей катушки с вихревыми токами, индуцированными в экране. Согласно проведенным расчетам максимально приложенная распределенная электромагнитная нагрузка к поверхности экрана составляет 43 кПа. Максимальные эквивалентные напряжения в экране из-за расчетной нагрузки со стороны магнитного поля приходится на внутреннюю оболочку экрана и равны 3,8 МПа, что значительно ниже допустимой величины напряжения 82 МПа. Максимальные смещения в экране от действия электродинамических сил происходят во фланцах экрана и равны 0,03 мм. Во внутренней цилиндрической оболочке экрана при этом возникают сжимающие осевые напряжения величиной 0,8 МПа. Согласно выполненным расчетам условие устойчивости радиационного экрана выполняется. Запас по устойчивости оболочки составляет 64. Статическая прочность экрана при воздействии на него расчетной нагрузки от переменного магнитного поля в процессе вывода из обмотки энергии обеспечивается.

Холодная масса подвешивается к вакуумному сосуду через систему тяг (рис. 8), изготовленных из Inconel 718 и расположенных таким образом, чтобы выдерживать ее собственный вес, ускорение во время грузоподъемных работ, транспортные ускорения, а также децентрирующие магнитные силы. Система подвески включает в себя 4 верхних стержня (плоскость XU , по 2 стержня с каждой стороны), 4 нижних (плоскость XU , по 2 стержня с каждой стороны), а также 4 горизонтальных (ось Z , по 2 стержня с каждой стороны). На конце каждого стержня подвески устанавливается коническо-сферическая шайба, позволяющая

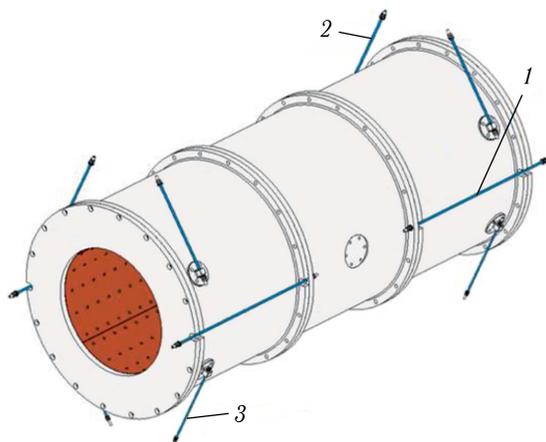


Рис. 8. Расположение тяг подвески холодной массы: 1 — горизонтальные тяги; 2 — верхние тяги вертикальной подвески; 3 — нижние тяги вертикальной подвески

компенсировать перекосы и избегать нагружения стержней изгибающими напряжениями.

Выбор размеров стержней подвески холодной массы был сделан с учетом:

- веса холодной массы: 17775 Н (включая 1000 Н веса термического экрана);
- отсутствия сейсмического ускорения, так как место окончательной установки классифицируется как «несейсмическая зона»;
- ускорения подъема: 1 г (с коэффициентом запаса 1,0 по пределу текучести материала согласно UNI EN 13155);
- магнитных децентрирующих сил (с упругими константами: $k_x, k_y, k_z = 1950, 1950, 4860$ Н/мм), действующих на сверхпроводящую катушку при ее смещении относительно центра ярма.

Из-за необходимости частично компенсировать дифференциальное сжатие между стержнями, холодной массой и вакуумным сосудом во время охлаждения только часть требуемой предварительной нагрузки стержней может быть создана во время сборки при комнатной температуре. По этой причине на теплых концах нижних вертикальных и продольных тяг установлены комплекты тарельчатых пружин. Эти стопки пружин рассчитаны на то, чтобы стать плоскими до того, как будет достигнуто полное сжатие. В результате система станет упругосимметричной в плоскости YZ после охлаждения, но не будет таковой при комнатной температуре. Это могло бы привести к неуравновешенному импульсу по оси Z при ускорении в процессе транспортировки. Поэтому для транспортировки требуется установка временных упоров.

Окончательное положение холодной массы после ее смещения относительно ярма под действием электромагнитных сил рассчитано с учетом упругости всей системы, т. е. с учетом упругости не только тяг подвески, но и оболочек вакуумного сосуда, а также пакета тарельчатых пружин (предполагается, что они становятся полностью плоскими после охлаждения).

При начальном смещении холодной массы относительно магнитопровода по оси магнита Z , равному 5 мм, для уравнивания магнитной силы с учетом упругих свойств подвески требуется дополнительное смещение на 0,72 мм. Таким образом, общее окончательное смещение при рабочем токе магнита составит 5,72 мм. Такое дополнительное смещение 0,72 мм совместимо с имеющимися зазорами внутри вакуумной камеры и является допустимой величиной деформации для гибких элементов связи на криокулерах и тоководах.

Аналогичным образом рассчитано окончательное смещение под действием децентрирующих магнитных сил в перпендикулярных оси магнита направлениях X и Y . Дополнительное боковое смещение (в направлении оси X) равно 0,7 мм, а максимальное вертикальное смещение (в направлении оси Y) — -0,3 мм вниз (но для начального смещения 10 мм). Поскольку максимально допустимое смещение холодной массы в любом направлении при сборке и выравнивании ее положения составляет 5 мм в любом направлении, максимальное дополнительное боковое и вертикальное смещение будет намного меньше и определено совместимо с ограничениями системы.

Предварительная нагрузка стержней должна быть создана при комнатной температуре с учетом того, что сжатие при охлаждении как стержней, так и холодной массы увеличит ее. Точно так же вертикальное положение холодной массы при комнатной температуре должно быть задано таким образом, чтобы после охлаждения ее ось выровнялась относительно оси вакуумного сосуда.

Вакуумный сосуд криостата изготовлен из нержавеющей стали AISI 316L, сплава с хорошей свариваемостью, обеспечивающего прочность конструкции и не намагничивающегося в магнитном поле. Криостат (рис. 9) является конструктивным элементом для передачи нагрузок, действующих на холодную массу, на опоры ярма. Сосуд состоит из нескольких компонентов, которые собираются вокруг холодной массы с уже установленным тепловым экраном, основные из которых следующие:

- наружная оболочка, соответствующим образом усиленная вблизи точек крепления стержней подвески и возле опорных кронштейнов (имеет два боковых фланца для сопряжения с боковыми корпусами криокулеров и два патрубка CF63 для соединения с вакуумной насосной системой и вакуумметром);
- внутренняя оболочка;
- две торцевых крышки, которые привариваются к обечайкам во время сборки криостата;

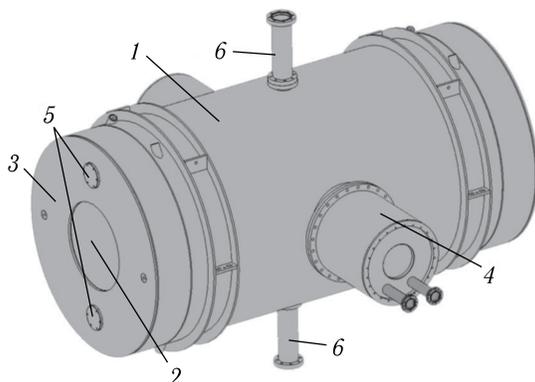


Рис. 9. Криостат. Основные компоненты: 1 — внешняя вакуумная оболочка; 2 — внутренняя вакуумная оболочка; 3 — торцевая крышка вакуумной оболочки; 4 — патрубок криокулера; 5 — фланцевые смотровые окна; 6 — патрубки вакуумной системы (датчик вакуума и турбомолекулярный насос)

— пара цилиндрических патрубков, соединенных фланцами с внешней оболочкой и вмещающих криокулера и токовводы.

Обе торцевые крышки имеют фланцевые смотровые отверстия, которые используются для контроля положения холодной массы после сборки при комнатной температуре, а также для установки временных транспортных стержней.

Проведенные расчеты для трехмерной модели FEM, включающей холодную массу и систему подвески, позволили убедиться, что выбранная конструкция вакуумного сосуда обеспечивает работу магнита во всех режимах.

ТОКОВВОДЫ

Токовводы должны потреблять при расчетном токе приемлемую для общего теплового баланса криостата часть вырабатываемой криокулерами холодной мощности.

На рис. 10 показана конструктивная схема токоввода с его основными компонентами. В качестве низкотемпературных токовводов будут использованы токовводы HTS-110 CryoSavers (модель CHS-050030). Поскольку эти токовводы рассчитаны на ток 500 А при температуре 64 К, а расчетному току магнита 354 А будет соответствовать температура «горячего» конца токоввода 43 К, у них сохраняется достаточно большой запас по току. Согласно расчетам напряженность магнитного поля в области токовводов HTS очень мала и ограничений на рабочий ток из-за магнитного поля не ожидается. В качестве обычных токовводов будут использованы латунные стержни размерами, являющимися результатом

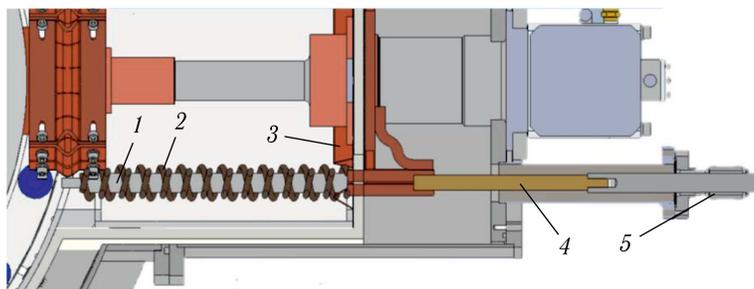


Рис. 10. Конструктивная схема токоввода: 1 — токонесущий элемент HTS-110 CryoSaver; 2 — шунт; 3 — теплообменник первой ступени; 4 — латунный токоввод; 5 — гермоввод

компромисса, позволяющим минимизировать теплоприток и резистивные потери.

Теплопритоки, поступающие по латунным токовводам, а также резистивные потери при включенном магните будут передаваться на первую ступень криокулера с помощью гибких медных связей соответствующего сечения и длины. Эти связи, обеспечивающие теплообмен, должны быть достаточно мягкими, чтобы компенсировать дифференциальное тепловое сжатие и обеспечивать силы реакции ниже допустимого уровня как для криокулера, так и для токоввода. Кроме того, узел теплообменника должен обеспечить отвод большей части тепловых потерь от токовводов и в то же время электрическую развязку токоввода и первой ступени криокулера. Конструкция данного теплообменника имеет основополагающее значение для надежной работы токовводов.

Параллельно сверхпроводящим токонесущим элементам высокотемпературных токовводов HTS-110 CryoSavers будут установлены резистивные шунты, чтобы в случае перехода токонесущего элемента в нормальное состояние ток протекал через них без перегорания сверхпроводящего токонесущего элемента. Эти шунты должны иметь такие размеры, чтобы в нормальных условиях они не только не передавали слишком много тепла холодной массе, но и не нагревались выше допустимой температуры в случае перехода в нормальное состояние токонесущего элемента. Они будут изготовлены из бронзовой проволоки (90 % Cu 10 % Zn) диаметром 4 мм, намотанной по спирали вокруг токовводов HTS.

Для оценки эффективности защиты токовводов HTS с помощью шунтов были произведены расчеты переходного термического процесса, при которых нагревание шунта рассматривалось как адиабатический процесс. При расчетах использовались кривые снижения тока после перехода катушки в нормальное состояние и в случае ее быстрого разряда — на защитное сопротивление. Удельное сопротивление бронзы увеличивается с ростом температуры, увеличивается и ее удельная теплоемкость. В результате температура шунта стабилизируется ниже 100 K в случае

незащищенного перехода катушки в нормальное состояние и чуть выше 180 К в случае ее быстрого разряда после обнаружения нормальной зоны в тоководах HTS.

Результаты расчетов подтвердили, что даже в самых неблагоприятных условиях шунты обеспечат эффективную защиту тоководов HTS.

МАГНИТОПРОВОД

Магнитопровод включает в себя «бочку», образованную восьмью балками, и два полюса, изготовленных из низкоуглеродистой конструкционной стали 1010 (см. рис. 2). В верхней и нижней балках бочки имеются отверстия для размещения патрубков с фланцами CF63, соединенных с вакуумным сосудом: на нижнем патрубке установлен турбомолекулярный насос, на верхнем — вакуумметры. Каждая из двух боковых балок «бочки» состоит из двух половин и в собранном виде имеет центральное круглое отверстие для размещения патрубков криокулеров.

Криостат крепится к опорным кронштейнам, закрепленным на нижних частях боковых балок магнитопровода, которые будут воспринимать его вес и магнитные силы, действующие на сверхпроводящую катушку. Кронштейны на магнитопроводе и опорные лапы криостата имеют разнонаправленные пазы для болтов, позволяющие выполнять точную регулировку взаимного положения криостата относительно магнитопровода в горизонтальной плоскости. Выравнивание в вертикальной плоскости будет осуществляться с помощью прокладок между кронштейнами и ножками криостата. Конструктивные зазоры позволяют смещать криостат относительно магнитопровода на ± 5 мм в любом направлении. После центрирования криостата относительно магнитопровода необходимо просверлить отверстия для штифтов и «заморозить» позицию криостата с помощью штифтов.

Положение оси магнита относительно оси пучка можно изменить с помощью регулировочных гаек и болтов на опоре магнитопровода.

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ И СИСТЕМА ЗАЩИТЫ

Система контроля и управления магнита GASSOL, а также система защиты сверхпроводящей обмотки предназначены для контроля состояния магнитной системы в соответствии с данными датчиков и сигналами состояния подсистем магнита и обеспечения сохранности магнита при «Нормальном режиме работы», «Нарушении нормального режима», «Аварии».

Система защиты сверхпроводящей катушки магнита после ее перехода в нормальное состояние должна обеспечить защиту катушки и тоководов HTS от перегрева, а также обеспечить снижение уровня

механических напряжений в катушке, вызванных градиентами температуры, что достигается:

- активной защитой за счет обнаружения начала зарождения нормальной зоны и частичного вывода энергии на демпферное сопротивление, расположенное снаружи криостата;

- пассивной защитой I за счет инициирования ускоренного перехода катушки в нормальное состояние путем нагрева проводника, примыкающего к внутренней поверхности опорного цилиндра после его нагрева вихревыми токами (QuenchBack);

- пассивной защитой II за счет ускорения аксиального распространения нормальной зоны путем увеличения эффективной теплопроводности в аксиальном направлении с помощью листов из высокочистой меди OFHC на внутренней и внешней поверхностях катушки.

Согласно проведенным расчетам при незащищенном переходе в нормальное состояние при расчетном токе температура горячей точки катушки достигает 124 К, что близко к допустимому значению 120 К.

Датчики температуры будут располагаться в точках с наибольшей температурой холодной массы, термического экрана и токовводов. На тягах подвески холодной массы будут установлены тензодатчики. Сигналы от тензодатчиков, датчиков температуры и вакуума, а также от потенциальных концов обычных токовводов поступают в логику системы управления, где обрабатываются и сравниваются с заданными уставками для этих датчиков. Туда же поступают сигналы отказа сети и резервного источника сети, а также сигналы отказа источника питания и криокулеров. В результате обработки должно быть принято решение о медленном или ускоренном выводе запасенной сверхпроводящей катушкой энергии.

Система контроля определяет набор условий, которые должны быть выполнены, прежде чем можно будет подать ток в сверхпроводящую обмотку. После получения «Ok» о состоянии всех подсистем магнита формируется сигнал «Магнитная система готова к вводу тока», после чего оператор может инициировать начало ввода тока. После достижения заданного тока оператор может инициировать «Рабочий режим», дав команду на открытие заслонки пучка. При «Нарушении нормального режима» работы и в случае «Аварии» система управления должна обеспечить отключение питания и произвести медленный или ускоренный вывод запасенной магнитом энергии на защитные сопротивления, а также обеспечить информирование оператора по всем каналам связи о состоянии системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сверхпроводящий магнит новой экспериментальной установки Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ, являющийся ключевым элементом магнитного газонаполненного сепаратора GASSOL, предназначен для создания аксиально-симметричного рабочего магнитного

поля до 6,9 Тл в апертуре ионопровода сепаратора диаметром 273 мм. Запасенная энергия магнитной системы при конструктивном токе 364 А равна 5,6 МДж.

Конструкция сверхпроводящей магнитной системы GASSOL основана на современных технических решениях. Для обеспечения эффективного охлаждения термического экрана криостата и холодной массы применено решение *swogen-free* на основе криокулеров, упрощающее конструкцию и повышающее надежность системы. Выравнивание температуры холодной массы и теплового экрана в стационарном режиме обеспечивают два диаметрально расположенных криокулера, оси которых лежат в горизонтальной плоскости.

Разработанная конструкция сверхпроводящей магнитной системы базируется на современных технических решениях. Для обеспечения эффективного охлаждения термического экрана и холодной массы магнита использовано решение *swogen-free* на основе криокулеров, упрощающее конструкцию и повышающее надежность системы. Для выравнивания температуры холодной массы и термического экрана в стационарном режиме используются два диаметрально расположенных криокулера, оси которых лежат в горизонтальной плоскости.

Согласно расчетам энергия, выделяемая за счет работы сил трения против действия магнитной силы в контактной зоне между внутренней поверхностью опорного цилиндра и наружной поверхностью сверхпроводящей катушки, не должна приводить к переходу обмотки в нормальное состояние. Выделившаяся энергия эффективно распределяется в объеме катушки с помощью листов из меди OFHC, заложенных в корпусной изоляции катушки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Оганесян Ю. Ц., Казаринов Н. Ю., Гульбекян Г. Г.* Концепция GASSOL — соленоида-сепаратора сверхтяжелых элементов // Письма в ЭЧАЯ. 2022. Т. 19, № 2(241). С. 78–88.
2. *Oganessian Yu. T., Utyonkov V. K.* Super-Heavy Element Research // Rep. Prog. Phys. 2015. V. 78, No. 3. 036301.
3. *Solovyev D. I., Kovrizhnykh N. D., Gulbekyan G. G., Kazarinov N. Yu., Gikal K. B., Lisov V. D., Papenkov K. V.* Simulation of Ion Optics in a Gas-Filled Solenoid GASSOL // Nucl. Instr. Meth. A. 2023. V. 1052. 168263.
4. *Schwerdtfeger P., Seth M.* Relativistic Quantum Chemistry of the Superheavy Elements. Closed-Shell Element 114 as a Case Study // J. Nucl. Radiochem. Sci. 2002. V. 3, No. 1. P. 133–136.
5. NM1011.00.0000.ТР. Технический проект магнитной системы для разделения сверхтяжелых элементов GASSOL. ООО «Нева-Магнит». СПб., 2022.
6. *Military U. S.* Handbook-5A. Metallic Materials and Elements for Flight Vehicle Structures. U.S. Department of Defense. FSC 1500. 1966.