

УДК 621.384.634+621.318+537.312.62

**СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ НУКЛОТРОНА И ИХ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СИНХРОТРОНЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ SIS100 ПРОЕКТА FAIR***Коваленко А.Д., Кекелидзе В.Д., Трубников Г.В., Ходжибагян Г.Г. (ОИЯИ, г. Дубна, Московская обл.)*

В начале 1970-х годов в ведущих научных центрах мира, занимающихся изучением фундаментальных проблем физики ядра и строения материи, начался этап разработки и освоения магнитных и ускорительных технологий, базирующихся на сверхпроводимости. Эффект сверхпроводимости для создания магнитов протонного синхротрона с амплитудой поля, существенно превышающей предел для обычных магнитов ($B \sim 2$ Тл), был реализован в Лаборатории Э. Ферми (Батейвия, США). Магнитная система Тэватрона амплитудой поля в рабочей апертуре до 4,7 Тл, установленная в туннеле синхротрона на энергию 500 ГэВ, позволила удвоить энергию ускорителя. Поле в магнитах Тэватрона формируется многовитковой обмоткой, изготавливаемой на прецизионном оборудовании. Точность ее геометрических размеров определяет качество магнитного поля в апертуре. Сверхпроводящие магниты этого типа в модернизированном виде были применены в проектах других ускорителей и получили название магниты типа $\cos \theta$. Магниты охлаждаются последовательно, время на захолаживание магнитной системы до рабочей температуры измеряется неделями.

Прецизионный магнит типа $\cos \theta$, криостат с сосудом для жидкого гелия, тепловой экран, вакуумный кожух, а также крепления магнита в криостате являются составными частями чрезвычайно трудоемкой в изготовлении, металлоемкой и дорогостоящей криогенно-магнитной системы. Для существенного упрощения и удешевления конструкции как сверхпроводящего магнита, так и системы его криостатирования в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ для специализированного синхротрона релятивистских ядер Нуклотрон [1, 2] были разработаны магниты нового типа [3]. Их принципиальное отличие заключалось в использовании вместо прецизионного магнита типа $\cos \theta$ магнита с геометрией сечения типа «оконная рама» и вместо плоского сверхпроводящего кабеля резерфордовского типа специально разработанного трубчатого сверхпроводящего кабеля, предназначенного для импульсных магнитов с большой скоростью

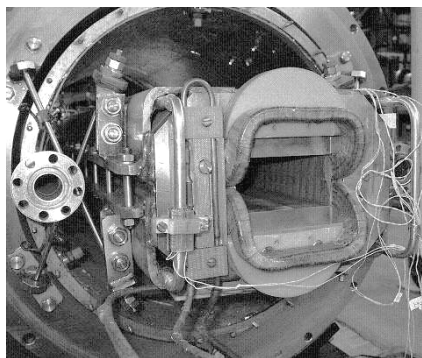
изменения поля. Трубчатый кабель в отличие от кабеля резерфордовского типа не имеет на пути теплового потока от сверхпроводника к гелию витковой или корпусной электрической изоляции, что существенно улучшает условия криостатирования сверхпроводника. Кроме того, использование в качестве криоагента двухфазного гелия делает условия охлаждения сверхпроводника в трубчатом кабеле импульсных магнитов ускорителя уникальными, что позволяет работать с рекордно большой скоростью изменения поля 4 Тл/с и выше [4]. В целом принятая концепция позволила минимизировать поперечное сечение магнита Нуклотрона, обойтись без гелиевого сосуда внутри криостата, обеспечить режим работы с крутизной нарастания и спада поля 4 Тл/с, сэкономить материалы, мощность источника питания, упростить внешнюю инфраструктуру и, что особенно важно, наладить изготовление и испытания магнитов, базируясь на производственных мощностях ОИЯИ.

Нуклотрон ОИЯИ — прототип SIS100. Создание сверхпроводящего жесткофокусирующего ускорителя релятивистских тяжелых ядер Нуклотрона было мотивировано постановкой проблем релятивистской ядерной физики и квантовой хромодинамики, исследованиями цветовых степеней свободы в атомных ядрах. Для их экспериментального изучения были необходимы соответствующие пучки ускоренных частиц, которые не могли быть обеспечены действующим в то время синхрофазотроном без создания по сути нового ускорительного комплекса. Принципиальным был выбор максимальной энергии нового ускорителя. Большое значение для реализуемости нового проекта имели расположение кольцевой магнитной системы, построение магнитной и других основных систем синхротрона.

Исследованиями с использованием пучков релятивистских дейтронов, ускоренных на синхрофазотроне, было показано, что режим предельной фрагментации в ядерных столкновениях наступает при кинетической энергии налетающего ядра на нуклон больше 3,5 ГэВ. Это определило нижний порог кинетической энер-

гии пучков проектируемого Нуклотрона. Для размещения магнитной системы нового ускорителя было предложено использовать имеющийся технологический туннель периметром ~ 250 м, окружающий фундамент магнита синхрофазотрона. Размещение нового ускорителя в этом туннеле давало возможность получить максимальную энергию легких ядер (отношение заряда к атомной массе $\sim 1/2$) на нуклон 6 ГэВ при поле в дипольных магнитах 2 Тл, соответственно тяжелых (золото, уран) — до 4,5 ГэВ, что удовлетворяло критерию выбора энергии. К этому времени уже были разработаны модели сверхпроводящих магнитов с требуемым полем 1,8—2,5 Тл и образцы магнитов, способных работать с частотой повторения циклов 1 Гц. В середине 1980-х годов было завершено создание рабочих прототипов магнитов нового ускорителя [5]. В период с 1987 по 1992 г. были изготовлены и прошли комплексные испытания более чем 100 дипольных и 66 квадрупольных магнитно-криостатных модулей его магнитной системы [6]. Монтаж Нуклотрона был завершен в январе 1993 г., и в марте того же года проведен первый сеанс охлаждения и работы с пучком [7].

Использование имеющегося туннеля для размещения магнитной системы ускорителя позволило существенно снизить стоимость и сроки проведения строительно-монтажных работ. Миниатюризация поперечного сечения магнитов, их компактность и небольшая погонная масса (~ 300 кг/м), являющиеся следствием использования сверхпроводника, позволили разместить кольцо ускорителя в туннеле поперечным размером 2,5×3 м, а также смонтировать все элементы магнитной системы без кранового оборудования, пользуясь только переносными грузоподъемными механизмами. На рис. 1 показан

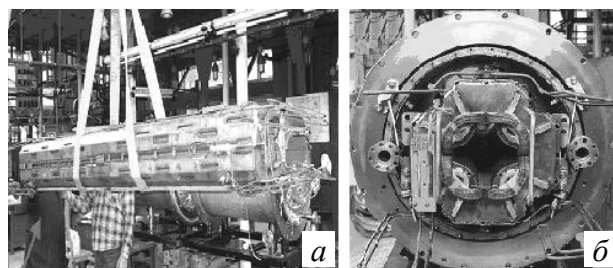


Р и с. 1. Кольцевая магнитная система Нуклотрона в туннеле

внешний вид кольца Нуклотрона в туннеле. Для охлаждения магнитов до рабочей температуры 4,5 К создана инфраструктура, включающая необходимые технические и технологические средства для хранения газообразного гелия, его охлаждения, ожижения и транспортировки. С марта 1993 г. по настоящее время Нуклотрон находится в режиме эксплуатации. Очередной 42-й сеанс его работы состоялся в декабре 2010 г. [8].

В начале 2000 г. дирекция Лаборатории по исследованиям с тяжелыми ионами GSI (Германия) обратилась к ОИЯИ с предложением о начале совместных работ по усовершенствованию уникальных быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов нуклотрона для создания на их основе магнитов тяжелоионного быстроциклирующего синхротрона SIS100. О соответствующей перспективной программе исследований и поставленных целях совместных разработок было доложено на Международной конференции по ускорителям заряженных частиц PAC'2001 [9]. В результате выполнения этой программы были значительно улучшены параметры дипольных и квадрупольных магнитов, разработана структура криогенно-магнитной системы и других элементов синхротрона SIS100. Результаты отражены в FBTR (FAIR Baseline Technical Report), опубликованном в марте 2005 г.

Конструкция магнитов Нуклотрона. Как дипольный, так и квадрупольный магнит разборный (рис. 2). Основным силовым элементом служит шихтованное железное ярмо, которое воспринимает динамические усилия, возникающие при импульсном возбуждении обмотки магнита. Ярмо диполя состоит из двух симметричных частей, соединяемых болтами. Необходимая точность внутренних габаритных размеров окна, определяющая разброс основной гармоники поля в дипольных магнитах, достигалась фрезеровкой и последующей шлифовкой

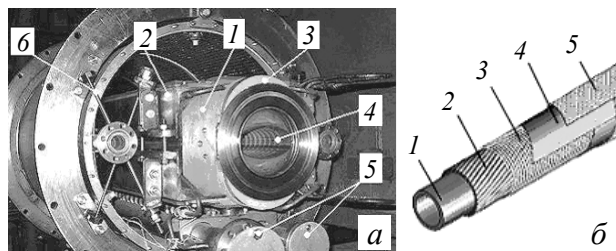


Р и с. 2. Общий вид дипольного (а) и квадрупольного магнитно-криостатного модуля (б) Нуклотрона

базовых поверхностей ярма, разброс интегральной дипольной составляющей магнитного поля минимизировали усреднением выборки необходимого числа штампованных пластин для каждой единицы сборки полуярма из разных партий электротехнической стали, контролем числа пластин и базового продольного размера, определяемого сварной конструкцией, которая состоит из двух торцевых пластин толщиной 20 мм и четырех уголковых профилей. В качестве материала для пластин и уголков использована сталь марки Сталь 3.

Квадрупольная линза имеет полюса гиперболического профиля. Ее ярмо состоит из четырех симметричных частей. Для серийного изготовления магнитопроводов линз регулярной магнитной структуры Нуклотрона изготовлены высокоточные штампы. Пластины с необходимой конфигурацией полюса штамповали из электротехнической стали марки 3413 ЭТ толщиной 0,5 мм. Аналогично дипольному магниту четверть ярма квадрупольной линзы собирали из шихтованного железа, скрепленного уголками и торцевыми пластинами. Магнитопровод линзы с помощью болтовых фланцевых соединений собирали из четырех полюсов на круглой направляющей заданного диаметра. Затем на токарном станке обрабатывали торцевые поверхности полюсов, доводя продольный размер магнитопровода до заданного значения с погрешностью до 0,05 мм. Полностью собранную обмотку возбуждения на точных шаблонных устройствах перед сборкой линзы закладывали в пазы полюсов и зажимали фланцами в строго фиксированное положение. Конфигурация поперечного сечения обмотки линзы была оптимизирована, исходя из критерия получения максимальной рабочей области с относительной линейностью градиента поля не хуже $1 \cdot 10^{-3}$.

Трубчатый сверхпроводящий кабель. Основными составляющими стандартного трубчатого кабеля Нуклотрона являются мельхиоровая трубка МНЖМц30-1-1 диаметром $5 \times 0,5$ мм (1), композитный ниобий-титановый провод в медной матрице (тип СКНТ-0.5-1045-0.42) (2), спиральный бандаж из нихромовой проволоки, прижимающий токонесущие провода к поверхности трубки (3), и электрическая изоляция (4, 5) (рис. 3, б). Диаметр ниобий-титановых нитей 10 мкм, число нитей в проволоке диаметром 0,5 мм 1045, шаг скрутки нитей ~ 5 мм, шаг



Р и с. 3. Дипольный магнит Нуклотрона в сборе с вакуумной камерой (а), композитный сверхпроводящий трубчатый кабель (б): 1 — ферромагнитное ярмо; 2 — стальные уголки, скрепляющие ярмо; 3 — лобовая часть сверхпроводящей обмотки возбуждения магнита; 4 — вакуумная камера; 5 — гелиевые коллекторы; 6 — подвески магнита

транспонирования проволок ~ 47 мм, число проволок 31, номинальный ток кабеля 6 кА.

Использование в качестве криоагента двухфазного гелия в сравнении со сверхкритическим позволяет снизить в несколько раз расход, прокачиваемый через магнитную систему [10]. Сравнительно малое количество гелия, запасенного в магнитной системе ускорителя, и высокое допускаемое давление в охлаждающих каналах обеспечивают в целом всей криогенной системе высокую безопасность в аварийных режимах. Магнитно-криостатная система на основе магнитов с трубчатой обмоткой не требует гелиевого сосуда. Это облегчает доступ к магнитам, линзам и другим устройствам, расположенным внутри разборного вакуумного кожуха, упрощает поиск и устранение гелиевых течей в вакуумный изоляционный объем.

Важным фактором, характеризующим эффективность охлаждения сверхпроводящего кабеля в режиме быстропеременного магнитного поля, является степень деградации критического тока в нем в зависимости от скорости изменения магнитного поля в апертуре диполя. Благодаря тому, что в трубчатой сверхпроводящей обмотке магнитов Нуклотрона поток тепла, вызванный ее импульсным возбуждением, на пути к хладагенту не встречает ни витковую, ни корпусную электрическую изоляцию, деградация критического тока не превышает нескольких процентов даже при большом динамическом тепловыделении в обмотке. Измеренная деградация критического тока в обмотке, возбуждаемой непрерывными импульсами тока треугольной формы, не превышает 8% при скорости изменения магнитного поля 8 Тл/с. Деградация критического тока при скорости изменения поля 4 Тл/с, являющейся проектной для Нуклотрона, составила

не более 5% [11]. Разница температуры между сверхпроводником и охлаждающим гелием в обмотке магнита составляет $\sim 0,05$ К при скорости изменения поля 4 Тл/с. Эти результаты подтвердили высокую эффективность охлаждения сверхпроводника в трубчатом кабеле предложенной конструкции. Хорошие условия охлаждения являются фактором, позволяющим магнитам не только работать при большой скорости изменения магнитного поля, но и обеспечивать эксплуатационную надежность, особенно в радиационных условиях.

Суммарных потерь в кабеле новой конструкции при скорости изменения магнитного поля 4 Тл/с почти нет, потери, вызываемые вихревыми токами в кабеле, не превышают аналогичные в связке электрически изолированных проводов эквивалентной массы и объема. Общие энергетические потери определяются только характеристиками применяемых сверхпроводящих проводов и мельхиоровой трубки.

Магнитно-криостатные модули. В магнитной структуре кольца Нуклотрона 96 дипольных и 64 квадрупольных магнита. В измерительных периодах ускорителя установлены еще по четыре диполя и квадруполь. Для удобства монтажа магнитной системы ускорителя на месте (в туннеле с ограниченными размерами поперечного сечения) необходимы магнитно-криостатные модули, обеспечивающие минимально необходимое число соединений между ними и максимально возможное удобство их выполнения. Основные положения концепции магнитной системы [12], предложенной и реализованной впервые в Нуклотроне, следующие:

система собирается из одинаковых, легко заменяемых магнитно-криостатных модулей трех видов для дипольных, фокусирующих и дефокусирующих магнитов;

обмотка возбуждения сверхпроводящих магнитов выполняется из трубчатого сверхпроводника и охлаждается потоком двухфазного гелия в диапазоне изменения паросодержания от 0 до 1;

все модули структуры гидравлически параллельно подключены к питающему и отводящему гелиевым коллекторам.

Магниты закреплены в криостате на восьми тягах, рассчитанных таким образом, что после охлаждения магнита от комнатной температуры

до гелиевой положение в пространстве его оптической оси не изменяется. К обоим торцам вакуумного кожуха с помощью накидных фланцев присоединены гибкие сильфонные элементы, позволяющие при юстировке перемещать соседние модули на необходимое расстояние. Модуль устанавливается на подставку с приспособлением для юстировки. Вакуумные кожухи модулей соединяются между собой с помощью разъемных муфт, обеспечивающих доступ к электрическим и криогенным коммуникациям, аппаратуре для диагностики пучка, расположенным в малых промежутках между магнитами. При сборке магнитно-криостатной системы Нуклотрона с помощью разборных вакуумных соединений связываются гелиевые коллекторы, трубопроводы жидкого азота, вакуумная камера и разъемные муфты вакуумного кожуха соседних модулей.

В каждом модуле, помимо электроцепи собственного магнита, имеются транзитные кабели электрической связи магнитов других групп. Для электрического соединения соседних модулей в каждом промежутке между магнитами необходимо выполнить четыре электрических спая трубчатых сверхпроводящих кабелей. Для этого в местах спая удаляются изоляционное покрытие и бандажная нихромовая проволока. Затем оголенные участки двух совместно сложенных сверхпроводящих кабелей на длине ~ 150 мм плотно обматывают сверхпроводящей проволокой, предварительно сплюсненной до 0,2 мм и луженой, обжимают в кондукторе и заливают расплавленным оловянно-свинцовым припоем. При этом все гелиевые охлаждающие каналы модуля соединены через трубчатые керамические изоляторы последовательно с гелиевыми коллекторами этого модуля и проверены на герметичность на стенде.

Такая технология соединения модулей позволяет с высокой степенью вероятности исключить гелиевые течи в вакуумное пространство, окружающее магниты до установки в кольцо ускорителя.

Обмотки возбуждения магнитов и линз соединены в электрические цепи и через тоководы и тиристорные ключи эвакуации энергии подсоединены к источникам электропитания [13]. Транспортные силовые токовые цепи выполнены бифилярно для минимизации рассеянных магнитных полей.

Характеристики магнитов Нуклотрона (табл. 1). Все магниты прошли тестовые стендовые испытания для тренировки критического тока, определения тепловыделения в магните на рабочем температурном уровне 4,5 К как при нулевом токе питания (статический теплоприток), так и в рабочем цикле (динамическое тепловыделение), а также полный цикл магнитных измерений. Интегральные нелинейности магнитного поля в апертуре измеряли при работе в цикле со скоростью повышения и спада поля 2 Тл/с, амплитуде поля до 2,13 Тл при общей длительности цикла 2 с. Среднеквадратичный разброс эффективной длины всей серии из 100 диполей $\langle L_m \rangle$ не превышал систематическое значение более чем на 2,6 мм при эффективной длине ~ 1440 мм, т.е. $\Delta L/L = \pm 9 \cdot 10^{-4}$ в диапазоне 0—6,4 кА. Этот разброс еще мог быть уменьшен в 2—3 раза за счет соответствующей группировки рядом стоящих диполей в пары с противоположными отклонениями эффективной длины от средней.

Прецизионные измерения свидетельствуют о соответствии характеристик серии магнитов

необходимым требованиям устойчивой динамики пучка в ускорителе во всем заданном динамическом диапазоне изменения магнитного поля. Тем не менее отметим, что эффекты насыщения ферромагнитного материала, из которого изготовлено ярмо магнитов, приводят к заметному росту квадратичной нелинейности магнитного поля и, как следствие, к уменьшению эффективных поперечных размеров рабочей области апертуры магнита. Стандартный выход в таком случае состоит в использовании специальных маломощных магнитов — корректоров с различной конфигурацией поля. В магнитную структуру Нуклотрона также включены корректирующие магниты различной конфигурации.

Разработка и испытания новых моделей сверхпроводящих магнитов. Создание быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов Нуклотрона — магнитов первого поколения явилось технологическим прорывом. Однако динамическое тепловыделение на температурном уровне 4,5 К оказалось существенно больше, чем ожидалось. Этот недостаток был устранен в ходе разработки и создания второго поколения быстроциклирующих магнитов для синхротрона SIS100. Научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами оригинальные магниты Нуклотрона были улучшены с точки зрения их экономичности. В первую очередь были проанализированы возможности уменьшения динамического тепловыделения в магните при работе в цикле. Как видно из табл. 1, динамическое тепловыделение в диполе и квадруполе Нуклотрона составляет 53 и 30 Вт соответственно в режиме $dB/dt = 4$ Тл/с, $B_{\max} = 2$ Тл, $f = 1$ Гц. Измерения показали, что только 30% потерь вносит собственно сверхпроводящая обмотка, остальные 70% — стальное ярмо, которое в магнитах Нуклотрона имеет непосредственный механический и тепловой контакт с обмоткой. В связи с этим в первую очередь было предложено использовать сверхпроводящий магнит с температурой ярма 50—80 К и температурой обмотки $-4,5$ К [14]. Модели таких магнитов на базе оригинальных магнитов Нуклотрона были созданы и успешно испытаны [15]. Динамическое тепловыделение в данной модели дипольного магнита оказалось на уровне ~ 12 Вт, т.е. в 4 раза и более меньше по сравнению с оригинальными диполями. В режиме испытаний рабочим током было подано ~ 400 ты-

Т а б л и ц а 1. Основные параметры магнитов Нуклотрона

Параметр	Диполь	Квадруполь
Масса, кг	500	200
Конфигурация ярма	Оконная рама	Гиперболические полюса
Длина ярма (по железу), мм	1370	430
Апертура (горизонтальная/вертикальная), мм·мм	110×55	120×63
Число витков в обмотке	2×8	4×5
Индукция при 6 кА, Тл	1,98	—
Градиент поля при 5,6 кА, Тл/м	—	33,4
Длина сверхпроводящего кабеля в обмотке, м	62	24
Запасенная энергия, кДж	19,8	6,9
Динамическое тепловыделение, Вт: $dB/dt = 2$ Тл/с, $B_m = 2$ Тл, $f = 0,5$ Гц	21	12
$dG/dt = 33,4$ Тл/(м·с), $G_m = 33,4$ Тл/м, $f = 0,5$ Гц		
$dB/dt = 4$ Тл/с, $B_m = 2$ Тл, $f = 1$ Гц	53	30
$dG/dt = 66,8$ Тл/(м·с), $G_m = 33,4$ Тл/м, $f = 1$ Гц		

сяч циклов. Дegradaция характеристик магнита не наблюдалась.

Параллельно продолжалось исследование дипольного магнита с ярмом при температуре 4,5 К. В результате последовательных конструктивных модификаций удалось для дипольного магнита второго поколения снизить общее динамическое тепловыделение на уровне 4,5 К в 2,2 раза. Последовательные шаги по уменьшению тепловыделения иллюстрирует рис. 4. Основные конструктивные изменения, позволившие получить необходимый результат, состояли в замене ферромагнитной фермы, удерживающей ярмо, на немагнитную, в уменьшении площади лобовых частей обмотки, модификации лобовых частей ярма диполя, замене сверхпроводящего провода с диаметром ниобий-титановой нити 6 мкм на провод с диаметром нити ~4,2 мкм и некоторых других [16—18].

Использование модифицированных дипольных магнитов Нуклотрона в магнитной структуре быстроциклирующего тяжелоионного синхротрона SIS100 позволит сэкономить электроэнергию на ~1 млн евро в год при плановом объеме эксплуатации 6000 ч.

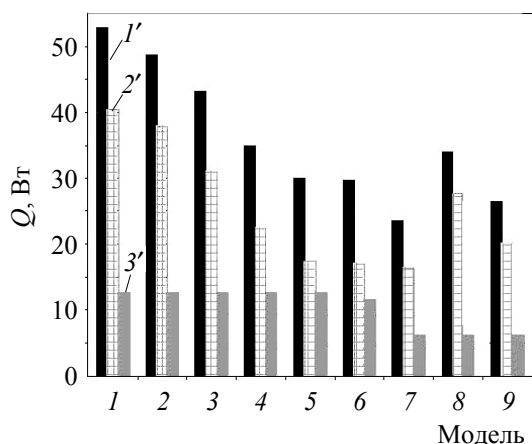
Полномасштабные модели магнитов для SIS100. В 2005 г. в связи с успешной оптимизацией магнитов было принято решение об изготовлении трех полномасштабных моделей дипольных магнитов (двух прямых и одного изогнутого) и одной полномасштабной модели квадрупольного магнита для SIS100. При этом разработка и изготовление одного полномас-

штабного прямого диполя и первого полномасштабного квадрупольного были включены как одна из составляющих проекта DIRACsecondary BEAMS, финансируемого Евросоюзом в рамках программы FP-6. В выполнении части этого проекта участвовали ОИЯИ, GSI и две немецкие фирмы BNN и Accel. Программа работ для ОИЯИ состояла в дальнейших исследованиях моделей магнитов и участии в создании обмоток магнитов для полномасштабных прототипов.

Первый этап работы по этому проекту выполнялся в 2005—2006 гг. и включал дополнительные исследования на моделях, имеющих размеры магнитов Нуклотрона. Эти исследования были необходимы для окончательной проверки работоспособности магнитов выбранного типа в условиях с разнообразными рабочими циклами магнитного поля SIS100. Для максимального приближения испытаний к ожидаемому рабочему режиму диполей SIS100 была изготовлена новая модель из двух последовательно соединенных магнитов Нуклотрона, ранее уже модифицированных для уменьшения динамического тепловыделения. Такая модель по суммарному динамическому тепловыделению с хорошей точностью должна соответствовать расчетным параметрам диполя с учетом увеличения его поперечного сечения и длины. Последовательное соединение обмоток также хорошо моделировало условия работы обмотки диполя SIS100 с точки зрения гидравлики охлаждающего потока гелия. Экспериментальные исследования показали, что полнодлинная модель диполя SIS100 обеспечивает устойчивую работу магнита в диапазоне заданных параметров всех рабочих циклов, наиболее напряженным из которых является $B = 2$ Тл, $dB/dt = 4$ Тл/с, $f \sim 0,55$ Гц [19].

Как следует из табл. 2, существенная разница между магнитами SIS100 и Нуклотрона заключается в их длине и размере апертуры. Магниты SIS100 примерно в 2 раза длиннее, их поперечное сечение также существенно больше.

Технология производства магнитов и необходимые приспособления должны обеспечить требуемые допуски при серийном производстве и приводить к экономии времени и средств. Для уменьшения потерь на вихревые токи в лобовых частях ламинированные пластины ярма имеют узкие (~0,15 мм) прорезы. Такие прорезы в пластинах могут быть выполнены с высокой точнос-



Р и с. 4. Гистограмма динамического тепловыделения в моделях магнитов Нуклотрона (1), 4KDP1 (2), PDP1s (3), PDP2s1 (4), PDP2s2 (5), PDP2s3 (6), PDP3s (7), 4KDP6 (8), 4KDP6a (9) SIS100: 1', 2', 3' — тепловыделение общее, в ярме и обмотке соответственно

Т а б л и ц а 2. Основные параметры первых полномасштабных моделей магнитов SIS100

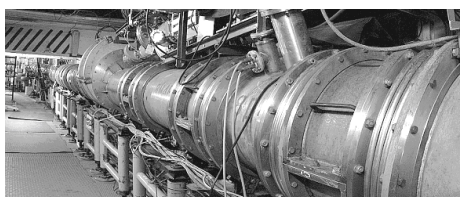
Параметр	Диполь	Квадруполь
Максимальное поле, Тл	2,11	—
Градиент, Тл/м	—	27
Эффективная длина при 4,5 К, м	2,756	1,3
Апертура вакуумной камеры, мм·мм	130×60	135×65
Размер окна в ярме, мм·мм	180×66	—
Диаметр вписанной окружности между полюсами квадруполя, мм	—	100
Скорость нарастания поля: Тл/(м·с)		54
Тл/с	4	

тью только на лазерном станке. В ярме каждого диполя SIS100 содержится 1600 таких пластин, всего пластин в ярме 11 024. Если учесть, что магнитная структура SIS100 включает 108 таких магнитов, то надо изготовить более 1,2 млн ферромагнитных пластин. При этом точность основного базового размера (вертикальный размер рабочего зазора) должна быть не хуже $2 \cdot 10^{-4}$, т.е. в интервале ± 6 —7 мкм.

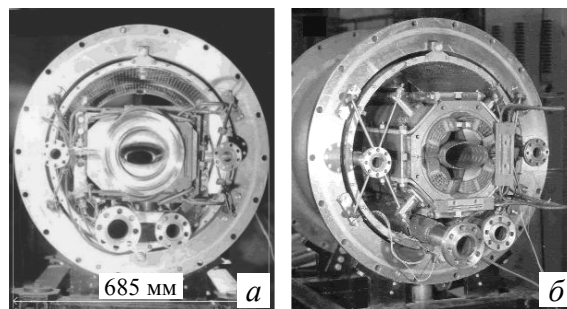
Ярмо квадруполя SIS100 аналогично квадруполю Нуклотрона состоит из четырех частей, его длина 1244 мм. Общее число квадруполей в структуре 168, т.е. всего необходимо изготовить более 1,66 млн пластин. Для этого должна быть разработана технология серийного производства и сборки как элементов, так и отдельных магнитных блоков и их модулей.

Элементы такой технологии были предложены и опробованы в ОИЯИ при изготовлении и сборке первых полномасштабных магнитов SIS100 (рис. 5, 6). Рабочие испытания проводили по стандартной разработанной для Нуклотрона методике.

Измерения гидравлического сопротивления охлаждающего канала и динамического тепловыделения в диполе оказались в хорошем соответствии с расчетными и ранее опубликованными



Р и с. 5. Фронтальный вид диполя PDP3s (модель 7) с минимальным тепловыделением



Р и с. 6. Первые полномасштабные модели структурных магнитов SIS100, изготовленные в ОИЯИ: а — прямой диполь после испытаний на стенде; б — квадрупольная линза SIS100 в криостате перед установкой на криогенный стенд

ми данными. В результате экспериментального исследования квадруполя обнаружилось недостаточно надежное в электрическом отношении место в его обмотке, которую впервые изготовили из одного цельного отрезка сверхпроводящего кабеля. Были изготовлены и испытаны две квадрупольные катушки, и в обеих при испытаниях выявился один и тот же дефект — межвитковое замыкание, что указывает на необходимость возврата к стандартной технологии намотки, по крайней мере, в случае использования стандартного трубчатого кабеля Нуклотрона [20, 21].

Модульная структура магнитно-криостатной системы SIS100. Синхротрон SIS100 будет установлен в одном подземном туннеле длиной 1083 м совместно с SIS300. Для него выбрана шестисуперпериодная ДФО-структура. Каждый секстант структуры состоит из 14 периодов длиной 12,9 м и, таким образом, в кольце 84 ДФО-периода. Арка включает восемь стандартных периодов, содержащих по два дипольных магнита, два периода с одним диполем и четыре периода без дипольных магнитов, т.е. длинный прямолинейный промежуток. Кроме структурных дипольных и квадрупольных магнитов, в арках кольца должны быть установлены 48 сверхпроводящих секступольных магнитов-корректоров хроматичности, 84 смещенных (горизонтальных и вертикальных) дипольных магнитов-корректоров орбиты пучка, 12 комбинированных мультипольных корректоров и 12 обычных секступолей для вывода пучка в прямолинейных секциях. Мониторы положения пучка устанавливаются в каждом периоде после фокусирующей линзы. Кроме того, во всех дугах (после дефокусирующей линзы)

устанавливаются перехватчики ионов, теряемых в результате перезарядки на атомах остаточного газа.

Магнитная система SIS100 разделена на магнитно-криостатные модули. Каждый модуль перед его монтажом в туннеле ускорителя проходит комплексные испытания на стенде. Наиболее простыми в исполнении являются модули, содержащие только диполи, поскольку число элементов в них минимально. Разнообразие модулей с квадрупольными гораздо больше, их сложность гораздо выше. Кроме структурных квадрупольных магнитов в модулях располагаются различного типа корректирующие магниты, мониторы положения пучка и перехватчики перезарядившихся на молекулах остаточного газа ионов. Наиболее сложными являются три модуля индивидуальной конструкции, предназначенные для участков инжекции, вывода пучка из SIS100 и перевода пучка из SIS100 в SIS300 [22]. В настоящее время рассматриваются два варианта построения модуля с квадрупольными линзами [23, 24]. Окончательный выбор должен быть сделан на основе испытаний.

Заключение. Создание новых образцов сверхпроводящих магнитов требовало обеспечения основными материалами, такими, как мелкодисперсный ниобий-титановый сверхпроводящий провод, тонкостенная медно-никелевая трубка, листовая электротехническая сталь, тонкая нихромовая проволока, электроизоляционные материалы с высокой электрической прочностью, эпоксидные компаунды, коррозионно-стойкая сталь широкого ассортимента и многое другое, — все это изготавливалось на отечественных предприятиях.

Разработкой магнитно-криостатной, вакуумной и диагностической систем SIS100, помимо ОИЯИ и GSI, занимались ВНИИНМ, ИФВЭ, ИТЭФ, ИЯФ СО РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ОАО «НПО Гелиймаш», ЗАО «ВНИТЭП», ЗАО «Криоинновация», ОАО «Ревдинский завод по обработке цветных металлов», Новолипецкий металлургический комбинат, ООО «НПО АТОМ».

В Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ в стадии подготовки находится новый специализированный корпус по сборке и испытаниям сверхпроводящих магнитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балдин А.М. О развитии ускорительного комплекса в ЛВЭ ОИЯИ и исследованиях по релятивистской ядерной физике. — В сб.: Нуклотрон и релятивистская ядерная физика. Дубна, ОИЯИ, 1974, с. 1.
2. Балдин А.М., Василишин Б.В., Дьячков Е.И. и др. Нуклотрон-ускорительный комплекс релятивистских ядер в ЛВЭ ОИЯИ. — В сб.: Всесоюз. сов. по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1974, т. II, с. 4—8.
3. Agapov N.N., D'yachkov E.I., Khodzhbagiyani H.G. e.a. A pulsed dipole magnet made from a hollow composite superconductor with a circulatory refrigeration system. — Cryogenics, 1980, v. 20, № 6, p. 345—348.
4. Дьячков Е.И., Зельдович А.Г., Смирнов А.А., Ходжибагян Г.Г. Криостатирование импульсных сверхпроводящих магнитов с параллельным питанием обмоток двухфазным гелием: Сообщение ОИЯИ 8-82-169, 1982.
5. Baldin A.M., Averichev S.A., Beznogikh Yu.D. e.a. Nuclotron status report. — IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983, v. NS-30, № 4, p. 3247—3249.
6. Baldin A.M., Averichev S.A., Agapov N.N. e.a. Superconducting fast cycling magnets of the Nuclotron. — IEEE Trans. Appl. Supercond., 1995, v. 5, p. 875—877.
7. Kovalenko A.D. Status of the Nuclotron. — In: EPAC'94, 1995, v. 1, p. 161—164.
8. Sidorin A., Agapov N., Alexandrov V. e.a. Status of the Nuclotron. Nuclotron-M project. — In: IPAC'10, 2010, p. 684—686.
9. Moritz G., Muehle C., Anerella M. e.a. Towards fast pulsed superconducting synchrotron magnets. — In: PAC'01, 2001, p. 211—214.
10. Khodzhbagiyani H.G., Kovalenko A.D., Fisher E. Some aspects of cable design for fast cycling superconducting synchrotron magnets. — IEEE Trans. Appl. Supercond., 2004, v. 14, № 2, p. 1031—1034.
11. Khodzhbagiyani H., Alexeev V., Averichev S. e.a. Design of new hollow superconducting NbTi cables for fast cycling synchrotron magnets. — Ibid., 2003, v. 13, № 2, p. 3370—3373.
12. Khodzhbagiyani H.G., Smirnov A.A. The concept of a superconducting magnet system for the Nuclotron. — In: Proc. of the Twelfth Intern. Cryogen. Engng Conf., Southampton, 1988, p. 841—844.
13. Смирнов А.А., Коваленко А.Д. Нуклотрон — сверхпроводящий ускоритель ядер в ЛВЭ ОИЯИ: создание, работа, развитие. — Письма в ЭЧАЯ, 2004, т. 1, № 6(123), с. 11.
14. Kovalenko A.D. The concept of an intermediate temperature yoke superconducting magnets. — In: The VLHC Magnet Workshop, 2000, p. 121.
15. Kovalenko A., Agapov N., Averichev S. e.a. Superferric model dipole magnet with the yoke at 80 K for the GSI future fast cycling synchrotron. — IEEE Trans. Appl. Supercond., 2003, v. 13, № 2, p. 1335—1338.
16. Kovalenko A., Agapov N., Averichev S. e.a. Superconducting fast-cycling dipole magnets for the GSI future accelerator facility. — In: EPAC'02, 2002, p. 2406—2408.

17. Kovalenko A., Agapov N., Donyagin A. e.a. Design and study of a superferric model dipole and quadrupole magnets for the GSI fast-pulsed synchrotron SIS100. — In: EPAC'04, 2004, p. 1735—1737.
18. Kovalenko A., Agapov N., Fischer E. e.a. New results on minimizing AC power losses in a fast cycling 2 T superferric dipole with a cold yoke. — IEEE Trans. Appl. Supercond., 2006, v. 16, № 2, p. 338—341.
19. Fischer E., Khodzhbagiyani H., Kovalenko A. Full size model magnets for the FAIR SIS100 synchrotron. — Ibid., 2008, v. 18, № 2, p. 260—263.
20. Kovalenko A., Agapov N., Alfeev A. e.a. Full length superferric dipole and quadrupole prototype magnets for the SIS100 at GSI: Status of the design and manufacturing. — In: EPAC'06, 2006, p. 2583—2586.
21. Kovalenko A., Agapov N., Alfeev A. e.a. Full size prototype magnets for heavy ion superconducting synchrotron SIS100 at GSI: status of manufacturing and test at JINR. — In: EPAC'08, 2008, p. 2443—2445.
22. FAIR Technical Design Report. GSI, Darmstadt, 2009.
23. Kovalenko A., Bychkov A., Fischer E. e.a. The FAIR SIS100 synchrotron: engineering design of superconducting magnetic modules. — IEEE Trans. Appl. Supercond., 2010, v. 20, № 3, p. 180—183.
24. Khodzhbagiyani H.G., Fischer E., Kovalenko A.D. New design for the SIS100/300 magnet cooling. — Ibid., 2006, v. 16, p. 411—414.

Поступила в Редакцию 14.04.11

УДК 537.312.62

РАЗРАБОТКА БЫСТРОЦИКЛИРУЮЩИХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ И КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ УСКОРИТЕЛЯ SIS300

Агеев А.И., Богданов И.В., Зинченко С.И., Зубко В.В., Каптанов Е.М., Козуб С.С., Слабодчиков П.И., Сытник В.В., Ткаченко Л.М., Ширшов Л.С., Щербаков П.А. (ГНЦ ИФВЭ, г. Протвино, Московская обл.), Воробьева А.Е., Губкин И.Н., Панцырный В.И., Потанина Л.В., Салунин Н.И. (ОАО ВНИИНМ, г. Москва)

Сверхпроводящий ионный синхротрон SIS300 является последней ступенью ускорительного комплекса FAIR, в котором ускоряются ионы U^{92+} до энергии на нуклон 33 ГэВ [1]. В перспективе планируется использовать синхротрон как растяжительное кольцо с возможностью повышения энергии ионов U^{28+} на нуклон с 400 до 1000 МэВ при максимальной интенсивности $1 \cdot 10^{12}$ ионов в секунду. Являющиеся основой магнитной структуры синхротрона сверхпроводящие быстроциклирующие магниты позволяют существенно увеличить энергию и среднюю по времени интенсивность ускоряемых ионных пучков.

Для устойчивой работы сверхпроводящих быстроциклирующих магнитов необходимо обеспечить температурный запас (минимальная разность между критической и рабочей температурой) на уровне 1 К во всех режимах работы ускорителя. Это достигается уменьшением тепловых потерь и эффективным охлаждением. Скорость изменения магнитного поля в сверхпроводящих магнитах больших ускорителей заряженных частиц, например, Теватроне (США), HERA (Германия), RHIC (США), LHC (Швейцария) с амплитудой более 3 Тл не превышает 0,1 Тл/с. Ее увеличение в 10 раз в SIS300 приве-

дет к существенному возрастанию тепловых потерь как в обмотке, так и их магнитопроводе. Это вызовет значительный нагрев сверхпроводящей обмотки, что снизит температурный запас, а также существенно увеличит нагрузку на криогенную систему и, как следствие, повысит эксплуатационные расходы при работе ускорителя.

Поскольку при высоких магнитных полях на обмотку действуют значительные ponderomotive силы, важной задачей является разработка системы крепления, ограничивающей ее перемещение под действием этих сил в пределах 50 мкм для обеспечения высокой однородности магнитного поля в апертуре. Задача усложняется еще и тем, что при столь высоких усилиях необходимо избежать значительной деформации изоляционных материалов во избежание электрических замыканий.

Повышенная радиационная стойкость, предъявляемая к магнитам SIS300, ограничивает использование традиционных изоляционных материалов, таких, как стеклолента с эпоксидным связующим, и вызывает необходимость применения новых материалов, например, полиимидной пленки с полиимидным связующим с температурой полимеризации не выше 500 К.