



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2010–13
ИФО

А.И. Агеев, И.В. Богданов, А.Е. Воробьева*, И.Н. Губкин*,
С.И. Зинченко, В.В. Зубко, Е.М. Каштанов, С.С. Козуб,
В.И. Панцырный*, Л.В. Потанина*, Н.И. Салунин*,
П.И. Слабодчиков, В.В. Сытник, Л.М. Ткаченко,
Л.С. Ширшов, П.А. Щербаков

Разработка быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов и криогенной системы ускорителя SIS300

Направлено в АЭ

*Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А.А. Бочвара (ВНИИНМ), Москва

Протвино 2010

Аннотация

Агеев А.И. и др. Разработка быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов и криогенной системы ускорителя SIS300: Препринт ИФВЭ 2010–13. – Протвино, 2010. – 27 с., 12 рис., 9 табл., библиогр.: 14.

Ионный синхротрон SIS300 является последней ступенью ускорительного комплекса Европейского исследовательского центра ионов и антипротонов (FAIR). Основу магнитной структуры ускорителя SIS300 составляют сверхпроводящие быстроциклирующие магниты, позволяющие существенно увеличить энергию и среднюю по времени интенсивность пучков частиц. В 2008 году ГНЦ ИФВЭ создал и успешно испытал модельный диполь SIS300, который достиг значения центрального магнитного поля 6.8 Тл при скорости его изменения 1.15 Тл/с, что выше существующих в мире аналогов. В настоящее время ГНЦ ИФВЭ при финансовой поддержке РОСАТОМа создает прототипы быстроциклирующих квадрупольного и корректирующих магнитов SIS300, в сотрудничестве с ВНИИНМ разрабатывает сверхпроводящий провод для этих магнитов, осуществляет разработку системы криостатирования SIS300, к изготовлению оборудования которой будут привлечены ОАО “Криогенмаш” и ОАО “Гелиймаш”. В статье приводится описание состояния работ, проводимых по созданию этих систем SIS300.

Abstract

Ageyev A.I. et al. Development of Fast Cycling Superconducting Magnets and Cryogenic System for SIS300 Accelerator Ring: IHEP Preprint 2010–13. – Protvino, 2010. – p. 27, figs. 12. tables 9, refs.: 14.

Ion synchrotron SIS300 is the last stage of the accelerator Facility for Antiproton and Ion Research in Europe (FAIR). Magnetic lattice of SIS300 accelerator is based on the use of fast cycling superconducting magnets, which allow for substantial increase in ion beam energy and intensity. In 2008, the State Research Center IHEP produced and successfully tested SIS300 model dipole which reached 6.8 T magnetic field at 1.15 T/s ramp rate that is world record for superconducting magnets. At present, IHEP develops prototypes of the fast cycling quadrupole and corrector magnets for the SIS300 under a financial support of the State Corporation of Atomic Energy "Rosatom". The VNIINM Institute develops a superconducting wire for these magnets in collaboration with IHEP. In addition, IHEP will develop a local cryogenic system for the SIS300 in cooperation with JSC "Cryogenmash" and "Geliymash". The status of R&D activity for the SIS300 subsystems in question is described.

1. Введение

Сверхпроводящий ионный синхротрон SIS300 является последней ступенью ускорительного комплекса Европейского исследовательского центра ионов и антипротонов (FAIR) [1]. Он служит для ускорения ионов U^{92+} до энергии 33 ГэВ/н, а также как растяжительное кольцо с возможностью повышения энергии ионов U^{28+} с 400 до 1000 МэВ/н при максимальной интенсивности 1×10^{12} ионов в секунду. Основой магнитной структуры этого синхротрона являются сверхпроводящие быстроциклирующие магниты, использование которых позволяет существенно увеличить энергию и среднюю по времени интенсивность ускоряемых ионных пучков.

При создании сверхпроводящих быстроциклирующих магнитов необходимо решить ряд задач. Первая из них предусматривает обеспечение температурного запаса магнитов (минимальную разность между критической и рабочей температурой магнита в цикле SIS300) на уровне 1 К, что должно обеспечить их устойчивую работу во всех режимах.

Вторая задача заключается в уменьшении тепловых потерь в этих магнитах и организации их эффективного охлаждения. Скорость изменения магнитного поля в сверхпроводящих магнитах существующих ускорителей заряженных частиц (например, Tevatron, HERA, RHIC, LHC) с амплитудой более 3 Тл не превышает 0.1 Тл/с. Увеличение на порядок величины скорости изменения магнитного поля в SIS300 приводит к существенному возрастанию тепловых потерь как в обмотке магнитов, так и в их магнитопроводе. Это вызывает значительный нагрев сверхпроводящей обмотки, что приводит к снижению температурного запаса магнитов, а также существенному

увеличению нагрузки на криогенную систему и, как следствие, повышению эксплуатационных расходов при работе ускорителя.

Так как при достижении высоких магнитных полей на обмотку магнита действуют значительные пондеромоторные силы, то третьей важной задачей является необходимость разработки системы крепления, ограничивающей перемещение обмотки под действием этих сил в пределах 50 мкм для обеспечения высокой однородности магнитного поля в апертуре магнита. Задача усложняется ещё и тем, что при столь высоких усилиях необходимо избежать значительной деформации изоляционных материалов во избежание электрических замыканий в обмотке.

Требование повышенной радиационной стойкости, предъявляемое к магнитам SIS300, накладывает ограничение на использование традиционных изоляционных материалов, таких как стеклолента с эпоксидным связующим, и вызывает необходимость использования новых материалов, например полиимидной пленки с полиимидным связующим с температурой полимеризации не выше 200°C.

Для решения поставленных задач потребовалось разработать новые конструкции сверхпроводящего провода, кабеля, магнитов. В 2003–2008 годах в рамках сотрудничества с Центром по исследованию тяжелых ионов (GSI, Дармштадт, Германия) ГНЦ ИФВЭ определил требования к новому сверхпроводящему проводу, участвовал в разработке конструкции кабеля, провел исследование сталей для магнитопровода быстроциклирующих магнитов, а также разработал, изготовил и успешно испытал высокопольный быстроциклирующий модельный дипольный магнит SIS300.

В настоящее время ГНЦ ИФВЭ при финансовой поддержке государственной корпорации РОСАТОМ создает прототипы быстроциклирующих квадрупольного и корректирующих магнитов SIS300, в сотрудничестве с ВНИИНМ разрабатывает сверхпроводящий провод для этих магнитов, осуществляет разработку системы криостатирования SIS300. Для участия в работах по созданию этой системы криостатирования прислали свои заявки ОАО “Криогенмаш”, ОАО “Гелиймаш” – ведущие предприятия России в этой области, с которыми ГНЦ ИФВЭ имеет опыт создания подобных систем. В следующих разделах статьи дается краткое описание состояния проводимых в России работ по созданию систем SIS300.

2. Сверхпроводящий высокопольный быстроциклирующий модельный дипольный магнит SIS300

2.1. Конструкция магнита

Результаты разработки и исследования дипольного магнита представлены в работах [2, 3], основные параметры магнита показаны в табл. 1.

Таблица. 1. Основные характеристики модельного дипольного магнита SIS300

Параметр	Величина
Номинальное поле в апертуре, Тл	6
Скорость изменения магнитного поля, Тл/с	1
Рабочий ток, кА	6.72
Запасенная энергия, кДж	260
Индуктивность, мГн	11.7
Число витков в 1 слое/квадрант	32
Число витков во 2 слое/квадрант	38
Внутренний диаметр обмотки, мм	100
Толщина бандажа, мм	30
Толщина железного ярма, мм	140
Толщина обечайки гелиевого сосуда, мм	10
Длина прямолинейной части обмотки, мм	580
Длина обмотки, мм	1020
Внешний диаметр гелиевого сосуда, мм	520
Вес холодной массы диполя, кг	1800

Диполь имеет сверхпроводящую обмотку (рис. 1), состоящую из двух двухслойных обмоток, соединённых между собой пайкой (95% Sn + 5% Ag). Каждая из обмоток намотана одним куском кабеля и между внутренним и наружным слоями этих обмоток имеются стеклотекстолитовые прокладки толщиной 1 мм с каналами для прохода гелия, охлаждающего наружный слой обмотки.

Обмотки изготовлены из кабеля резерфордовского типа, состоящего из 36 проволок, транспонированных с шагом 100 мм. Для уменьшения динамических потерь в обмотке была разработана сверхпроводящая проволока с уменьшенным диаметром ниобий-титановых волокон и низким значением шага скрутки этих волокон, а в кабель была введена проставка из нержавеющей стали толщиной 25 мкм. Сверхпроводящая проволока имеет следующие характеристики: внешний диаметр 0.825 мм, диаметр

волокна 4.4 мкм, шаг скрутки волокон 5 мм, отношение меди к сверхпроводнику 1.8 и критический ток 500–550 А (5 Тл, 4.2 К). Проволоки покрыты сплавом 95% Sn + 5% Ag толщиной 0.5 мкм.

Кабель прошел термообработку, чтобы обеспечить сопротивление между проволоками в продольном направлении R_a около 200 мкОм и в поперечном направлении R_c на уровне 20 мОм [4]. Кабель без изоляции имел следующие размеры: узкая сторона трапеции – 1.362 мм, широкая сторона – 1.598 мм, ширина – 15.1 мм. Изоляция кабеля состояла из трех слоев полииimidной пленки: первый слой толщиной 50 мкм, второй – 25 мкм, третий (включая 5 мкм kleящее покрытие) – 55 мкм, Толщина изоляции кабеля после сборки обмотки и ее запекания составила 98 мкм в азимутальном и 125 мкм в радиальном направлениях.

Проставка в кабеле существенно увеличивает его жесткость, что затрудняет намотку лобовых частей. Поэтому укладка витков в лобовой части осуществлялась по траектории постоянного периметра. Для обеспечения этого условия во внутреннем слое число витков в блоке не превышало 10, в наружном слое второй блок также разделен на две части.

При длине магнитопровода равной длине обмотки максимальное поле в лобовых частях составит 7.15 Тл, что превышает максимальное поле в центральном сечении 6.6 Тл. Для выравнивания максимальных полей в лобовых частях и центральном сечении необходимо укоротить магнитопровод на 257 мм с каждой стороны. При этом эффективная длина диполя составила 750 мм при центральном поле 6 Тл, а разница между геометрической длиной и эффективной равна 251 мм.

Допуски на точность изготовления определялись из условий максимальной вариации низших нелинейностей поля в пределах 2×10^{-4} и изменения центрального магнитного поля не более $\pm 5 \times 10^{-4}$. В соответствии с этими требованиями наиболее чувствительные параметры – радиус внутреннего слоя и углы первого блока. В линейных размерах допуски на эти параметры составляют 50 мкм. Допуски на другие радиальные и азимутальные размеры более свободны и равны 120 мкм. Допуски на геометрические параметры лобовых частей составляют 0.5 мм.

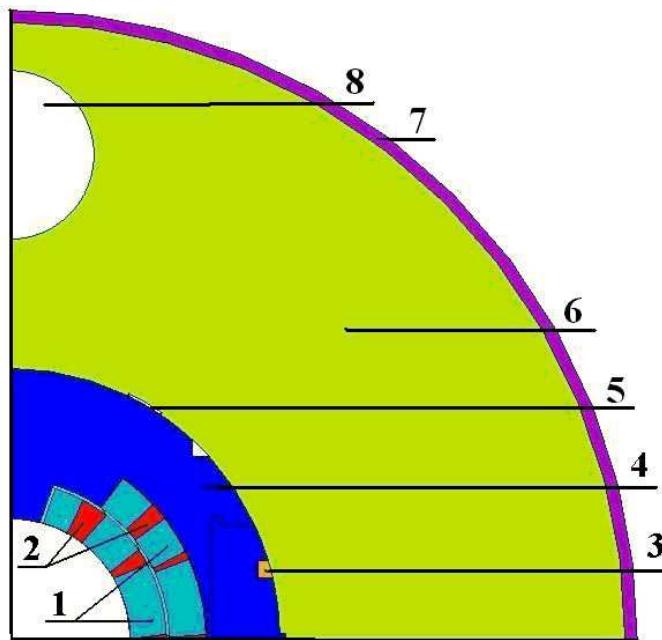


Рис. 1. Поперечное сечение высокопольного быстроциклического дипольного магнита (показан один квадрант): 1 – обмотка; 2 – межвитковые проставки; 3 – шпонка; 4 – бандаж; 5 – вырез; 6 – магнитопровод; 7 – оболочка из нержавеющей стали; 8 – отверстие для двухфазного гелия.

2.2. Анализ механических напряжений в обмотке магнита

Для выбора механической структуры магнита с помощью программы ANSYS методом конечных элементов проведен численный анализ механических напряжений в обмотке магнита на различных этапах его изготовления и работы. Основной задачей механической структуры является создание необходимого предварительного напряжения (престресса) в обмотке магнита с целью недопущения при вводе тока радиальных перемещений обмотки превышающих 50 мкм.

Сверхпроводящая обмотка ската воротниками бандажа из аустенитостабильной нержавеющей стали Нитроник 40, которые воспринимают силы, действующие со стороны витков обмотки, и фиксируют внешние границы обмотки. Чтобы увеличить их жесткость, воротники соединялись в блоки толщиной 47 мм. Блоки воротников помещались на обмотку, сжимались прессом и фиксировались с помощью шпонок из нержавеющей стали. Анализ показал, что воротники шириной 40 мм обеспечивают

радиальное перемещение обмотки не более чем на 50 мкм, однако для увеличения вклада магнитопровода в магнитное поле ширина воротников была уменьшена до 30 мм. В этом случае для предотвращения радиальных перемещений обмотки выше допустимых значений необходимо, чтобы в процессе сжатия обмотки также принимали участие магнитопровод и обечайка гелиевого сосуда.

Магнитопровод состоял из двух идентичных частей, расположенных на обеих сторонах (правой и левой) забандажированной обмотки. Контактная поверхность между двумя частями ярма располагалась в вертикальной плоскости. Средняя часть железного ярма, соответствующая прямолинейной части обмотки, состояла из пластин толщиной 1мм из электротехнической стали М700-100 (2.37% кремния). Каждая пластина изолирована с одной стороны. Пластины магнитопровода на лбах обмотки сделаны из нержавеющей стали 05Х20Н16АГ6 для уменьшения максимального поля на обмотке.

Обечайка гелиевого сосуда состояла из двух частей, изготовленных из нержавеющей стали 304L, соединенных сваркой. Параметры сварочного шва должны были обеспечить необходимую величину престресса в обмотке после сварки. В результате проведенной оптимизации были определены следующие допуски на контактные поверхности:

- При изготовлении внешний радиус воротника бандажа и внутренний радиус ярма в медианной плоскости должны совпадать. Это обеспечивает хороший контакт при вводе тока между воротником и магнитопроводом.
- При изготовлении зазор между воротниками и магнитопроводом в полюсе должен быть 0.5 мм. Это обеспечивает отсутствие контакта в данном месте.
- Перед сборкой зазор между половинами магнитопровода должен составлять 0.2 мм в верхней части вертикального разреза и 0.14 мм в нижней его части. После сборки и в процессе работы магнита этого зазора не должно быть.
- Интерференция между ярмом и обечайкой должна быть 0.16 мм на сторону.

Согласно проведенным расчетам, чтобы обеспечить радиальное перемещение обмотки менее 50 мкм, престресс должен быть 90 МПа, азимутальное напряжение в обечайке после сварки – 100 МПа, контактные поверхности всегда закрыты.

Полная продольная компонента магнитных сил, действующая на лобовые части, равна 272 кН. Под действием этой силы возникает перемещение лобовых частей обмотки, что вызывает переход обмотки в нормальное состояние. Для ограничения этого перемещения лобовые части были поджаты фланцами из нержавеющей стали.

2.3. Динамические тепловыделения и нагрев сверхпроводящей обмотки

Изменяющееся магнитное поле вызывает движение магнитного потока внутри сверхпроводящих нитей проволоки и создает в них незатухающие токи. Этот процесс является причиной гистерезисных потерь, которые пропорциональны частоте или производной поля dB/dt . Кроме того, переменные магнитные поля создают вихревые токи, протекающие по матрице проволоки (матричные потери) и между проволоками кабеля через контактные сопротивления между проволоками (кабельные потери). Эти потери пропорциональны $(dB/dt)^2$. Таким образом, динамические потери, возникающие в сверхпроводящих кабелях, складываются из гистерезисных и матричных потерь в проволоке и кабельных потерь. Потери в обмотке вычислялись для наиболее напряженного цикла SIS300: 1.6 – 6 – 1.6 Тл, длительностью 19.8 с (из них 11 с плато при 6 Тл) и составили: гистерезисные – 42.7 Дж/м, матричные – 13.9 Дж/м, кабельные – 11.4 Дж/м, полные – 68.0 Дж/м или 3.4 Вт/м.

Из-за изменяющегося магнитного поля в металлических элементах конструкции магнита также возникают вихревые токи. Эти токи являются дополнительным источником тепловыделений и возмущений магнитного поля. Вихревые токи в пучковой трубе, проставках и защитном экране, расположенных между обмоткой и бандажом, замыкаются сами на себя, а в шпонках через воротники. Для уменьшения потерь эти элементы изготовлены из нержавеющей стали 316L.

Расчеты показали, что вихревые токи вызывают следующие потери: в проставках – 0.03 Вт/м, в шпонках и воротниках – 0.35 Вт/м, в защитном экране – 2 Вт/м, в пучковой трубе – 1.6 Вт/м.

Выбор стали для магнитопровода магнитов SIS300 основывался на компромиссе трех параметров:

- маленькая коэрцитивная сила Нс для уменьшения гистерезисных потерь;
- большое электрическое сопротивление для уменьшения вихревых потерь;

- большая величина намагниченности насыщения M_s для уменьшения влияния эффектов насыщения на качество поля.

Так как магнитопровод состоит из пластин, вихревые токи в нем ожидались пренебрежимо малыми и основные тепловыделения связаны с гистерезисом магнитных свойств стали, расчетная величина которых составила 1.8 Вт/м.

Температурный запас магнита определяется минимальной разностью между критической и рабочей температурой в витках обмотки в цикле SIS300. Расчеты показали, что температурный запас магнита равен 1 К и определяется полюсным витком внутреннего слоя, для которого минимальная критическая температура диполя в цикле SIS300 равна 5.7 К.

2.4. Результаты испытаний магнита

Внешний вид магнита показан на рис. 2. Испытания магнита проводились в кипящем гелии при температуре 4.30 К. Обмотка имела сопротивление при комнатной температуре 0.383 Ом и RRR = 187.



Рис. 2. Сверхпроводящий высокопольный быстроциклирующий дипольный магнит.

На рис. 3 представлены результаты тренировки магнита. Номинальное значение магнитного поля было достигнуто за три перехода (квенча). За семь переходов тренировка была выполнена на 80%. В результате тренировки было достигнуто поле в апертуре магнита равное 6.8 Тл, что на 15% превышает номинальное значение. Во время тренировки переходы происходили попеременно в обеих обмотках магнита, что показывает одинаковое качество этих обмоток.

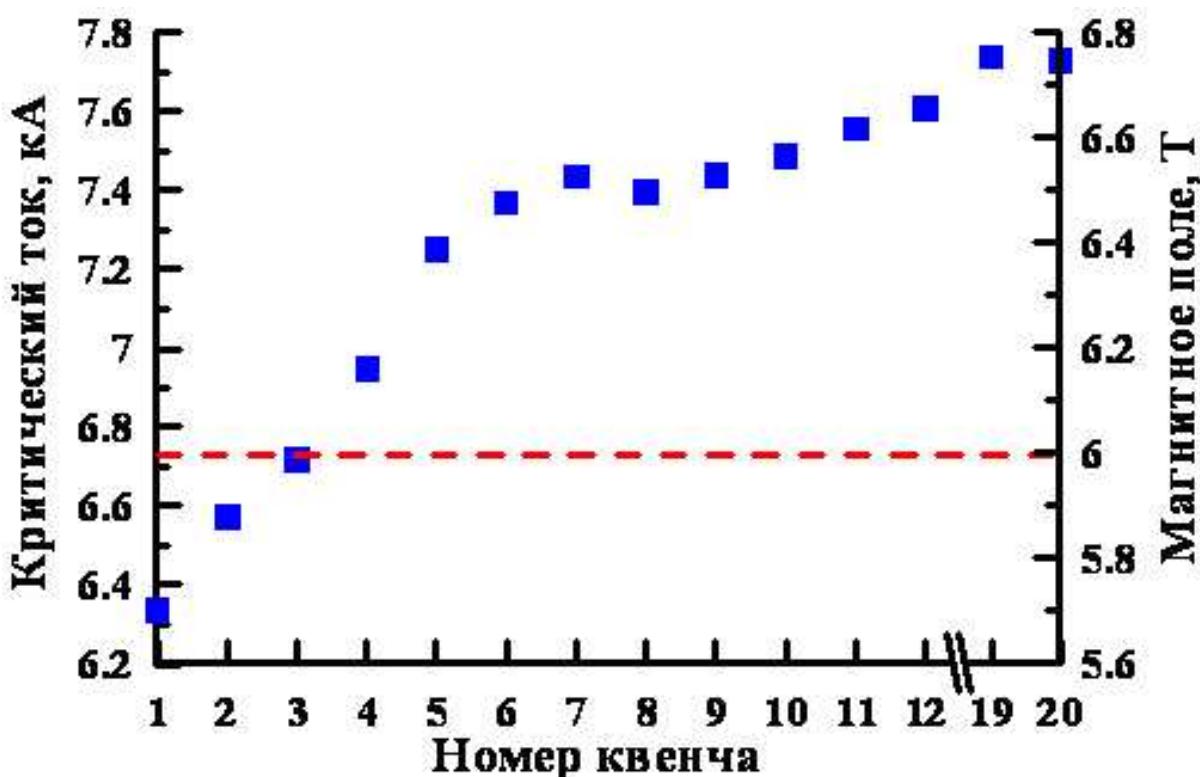


Рис. 3. Зависимость критического тока магнита от количества переходов магнита в нормальное состояние.

На рис. 4 представлены токи перехода для различных скоростей нарастания тока. Видно, что ток перехода (магнитное поле) не уменьшался до скорости 1300 А/с (1.15 Тл/с).

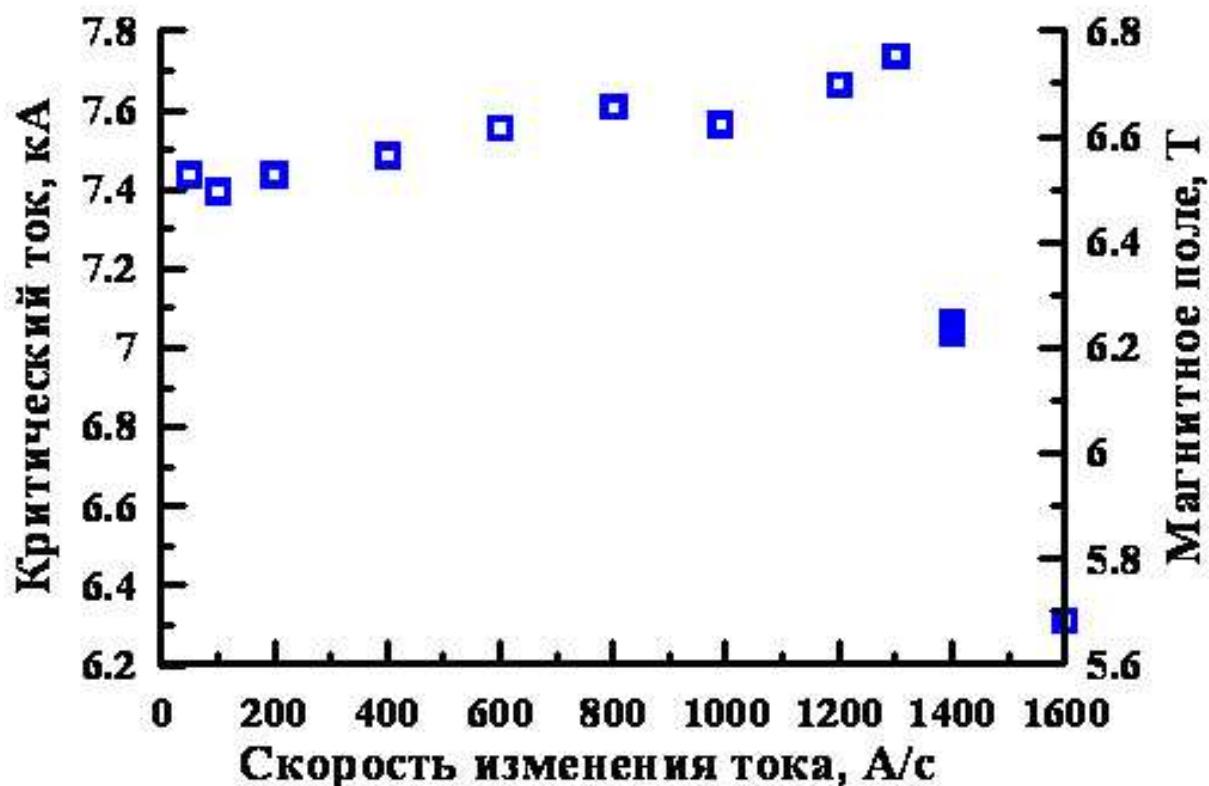


Рис. 4. Зависимость критического тока от скорости ввода тока в магнит.

Для измерения динамических потерь был использован метод Вильсона, потери измерялись в треугольных циклах с амплитудой 1, 2, 3, 4, и 5 кА. Выше тока 5 кА измерение потерь было затруднено из-за сильного влияния насыщения железного ярма. На рис. 5 представлены измеренные и рассчитанные потери в треугольных циклах $0 - I_{\max} - 0$ для скоростей ввода от 100 до 1000 А/с. Видно, что измеренные и рассчитанные потери согласуются до амплитуды 3 кА. При более высоких токах измеренные потери превышают рассчитанные величины. Анализ результатов показал, что возможной причиной наблюдаемого превышения потерь могут быть вихревые потери в магнитопроводе, однако это предположение требует дополнительного изучения.

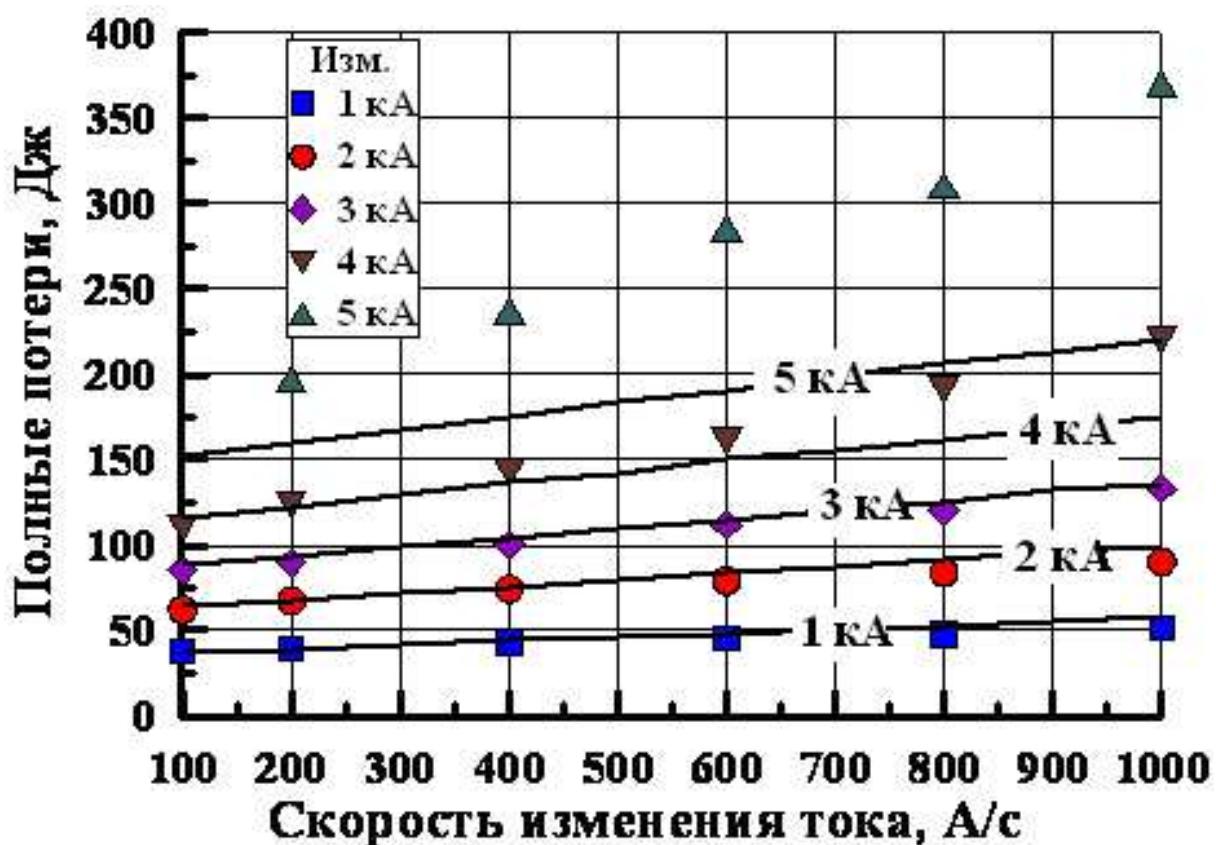


Рис. 5. Расчетные (сплошные линии) и измеренные зависимости динамических потерь в магните от скорости нарастания тока для различных максимальных токов (I_{\max}) в треугольных циклах $0 - I_{\max} - 0$.

3. Сверхпроводящий быстроциклирующий квадрупольный магнит SIS300

3.1. Токонесущий элемент

Обмотка магнита намотана кабелем резерфордовского типа, транспортированным из 19 проволок. Проволоки покрыты сплавом 95% Sn + 5% Ag толщиной 0.5 мкм. Кабель полностью кистоуниверсальный с шириной 8.45 мм, а средней высотой 1.56 мм (с изоляцией). Изоляция кабеля состоит из полиимидной пленки: трех слоев толщиной 25 мкм и слоя 55 мкм (включая 5 мкм клеящее покрытие). Толщина изоляции кабеля после сборки обмотки и её запекания составила 98 мкм в азимутальном и 125 мкм в радиальном направлениях.

Лобовые части квадрупольного магнита имеют форму, которая была разработана для магнитов УНК [5]. На торцах лобовых частей витки обмотки устанавливаются перпендикулярно продольной оси магнита, что позволяет сделать компактные лобовые части и облегчить их фиксацию в продольном направлении.

Для уменьшения потерь кабель имеет проставку из отожженной нержавеющей стали 316L шириной 6 мм и толщиной 25 мкм. После спекания обмотки контактное сопротивление в кабеле равно примерно 0.2 мОм в продольном и 20 мОм в поперечном направлениях.

Для намотки обмоточного блока квадрупольного магнита ВНИИНМ разработал и изготовил сверхпроводящую проволоку с уменьшенным диаметром и шагом скрутки NbTi-волокон для снижения динамических потерь. Для производства этого провода выплавлен слиток сверхпроводящего NbTi-сплава двойного дугового вакуумного переплава с содержанием титана 47 вес.%. Слиток подвергнут гомогенизирующему отжигу в вакууме и переработан в пруток, который затем подвергнут рекристаллизационному отжигу на воздухе и обточен. Для обеспечения резистивной матрицы между NbTi-волокнами методом вакуумной индукционной плавки выплавлен слиток сплава Cu-0,5%Mn. Слиток резистивного сплава переработан в пруток, а затем в трубы для изготовления чехлов триметаллической заготовки. Чехлы для первых и вторых многоволоконных заготовок изготовлены из медных труб с $RRR > 250$. Заполнители для формирования центрального медного сердечника для вторых многоволоконных заготовок изготовлены из медного прутка с $RRR > 250$. Токонесущая способность провода достигнута за счет введения в маршрут волочения прутков заключительных композитных заготовок ряда низкотемпературных диффузионных отжигов, вызывающих распад β -твердого раствора NbTi-сплава с выделением α -Ti-фазы.

Разработанный режим твистирования провода позволил минимизировать шаг скрутки волокон до 8 мм, не вызывая заметной деградации токонесущей способности и снижения технологичности провода. После калибровки на конечный диаметр провода были подвергнуты отжигу в вакууме для восстановления RRR меди. Поперечное сечение готового проводника диаметром 0.825 мм представлено на рис. 6, а данные металлографических и электрофизических исследований – в табл. 2.

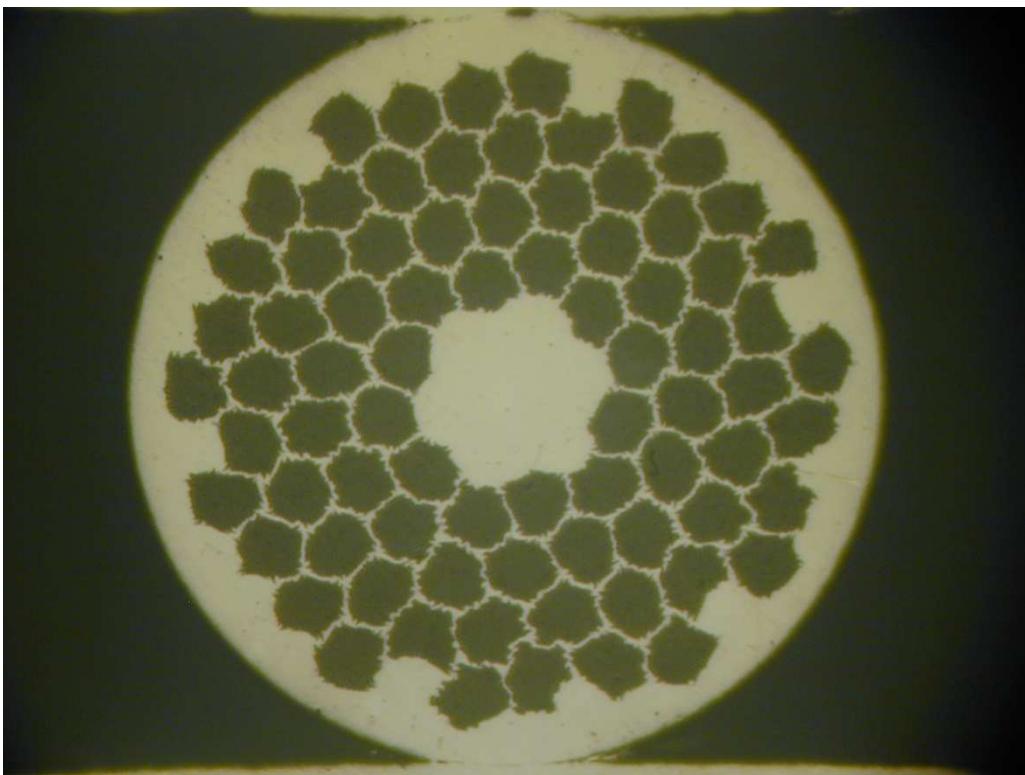


Рис. 6. Поперечное сечение сверхпроводящего провода диаметром 0,825 мм.

Таблица 2. Выходные параметры партии №3 сверхпроводящего провода

Параметр	Результаты измерений
Внешний диаметр	0.828 мм
Количество волокон	34242 шт
Шаг скрутки	8 мм
Направление скрутки	Правая скрутка
Соотношение медь/не медь	1.32
Диаметр волокна	2.91 мкм
Относительное остаточное сопротивление (RRR)	143
Критический ток при 5 Тл; 4,2 К; 0,1 мкВ/см	581 А
Параметр нарастания напряжения (5 Тл, 4,2 К)	54

3.2. Конструкция магнита

Результаты оптимизации геометрии квадрупольного магнита SIS300 представлены в работах [6, 7]. Основные параметры магнита показаны в табл. 3.

Таблица 3. Основные характеристики квадрупольного магнита SIS300

Параметр	Величина
Центральный градиент, Тл/м	45
Скорость нарастания градиента поля, Тл/м/с	10
Рабочий ток, кА	6.262
Максимальное поле в обмотке, Тл	3.51
Температурный запас, К	1.54
Запасенная энергия, кДж	38
Индуктивность, мГн	2
Число витков в обмотке	80
Внутренний диаметр обмотки, мм	125
Толщина бандажа, мм	22
Толщина железного ярма, мм	52
Эффективная длина, м	1

Однослойная обмотка (рис. 7) делится на три блока, что позволяет подавить первые три мультипольные гармоники в приближении бесконечно большой проницаемости в магнитопроводе с внутренней цилиндрической поверхностью. Изменение нижних интегральных нелинейностей поля должно быть в пределах 2×10^{-4} . Обмотка сжата воротниками бандажа из нержавеющей стали Нитроник 40. Толщина бандажа составляет 22 мм и он создает необходимый престресс обмотки величиной 90 МПа. Магнитопровод из стали 2212 имеет четыре выреза размерами 17×30 мм², расположенных симметрично под углом 45°, для размещения шинопроводов, а также четыре регулировочных болта для юстировки квадрупольного магнита в криостате.

Для снижения магнитного поля в обмотке длина магнитопровода меньше, чем длина обмотки, на 130 мм с каждой стороны. В этом случае максимальное поле в лобовых частях равно максимальному полю в поперечном сечении и составляет 3.51 Тл.

Магнитные силы (кН): F_x = 124,2; F_y = -143,3; |F| = 189,7. Динамические потери в обмотке были рассчитаны для стандартного треугольного цикла SIS300: 10 – 45 – 10 Тл/м при скорости 10 Тл/м/с. Компоненты потерь обмотки (Дж/м): гистерезисные – 10.7; матричные – 3.3; кабельные – 0.3; общие потери в обмотке – 14.3. Потери в магнитопроводе из стали 2212: гистерезисные – 5.0; от вихревых токов – 0.003 Дж/м. Общие потери в магните равны 19,3 Дж/м.

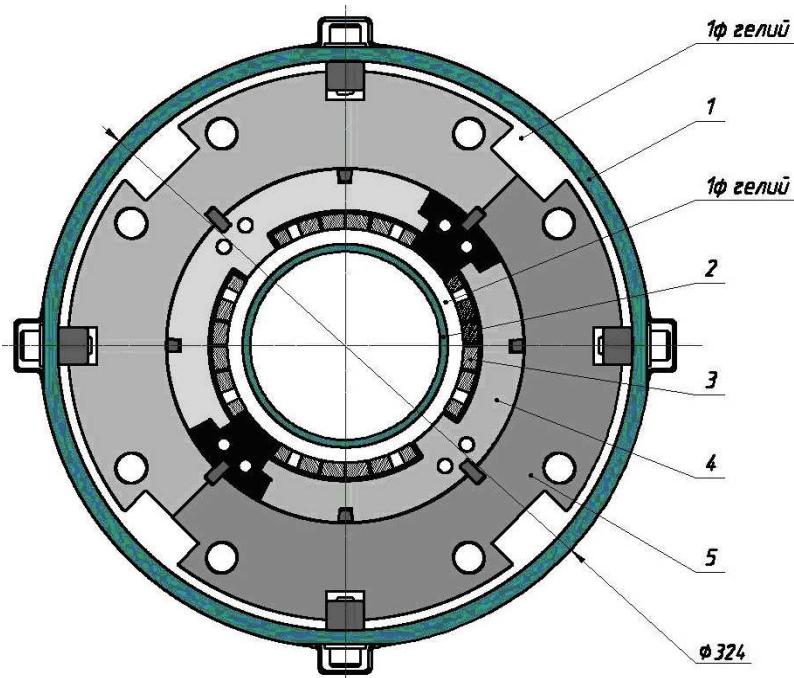


Рис. 7. Поперечное сечение сверхпроводящего квадрупольного магнита SIS300: 1 – обечайка гелиевого сосуда; 2 – пучковая труба; 3 – сверхпроводящая обмотка; 4 – бандаж из нержавеющей стали; 5 – магнитопровод; 1ф – однофазный гелий.

Для отработки технологии в 2010 году планируется изготовить модель квадрупольного магнита из дотянутого до диаметра 0.825 мм провода УНК, а в 2011 году произвести прототип квадруполя из провода, разработанного ВНИИНМ.

4. Сверхпроводящие быстроциклирующие корректирующие магниты SIS300

Ускоритель SIS300 имеет четыре типа корректирующих магнитов:

- 1) мультипольный корректор, состоящий из квадрупольного (QM), секступольного (SM) и октупольного (OM) магнитов;
- 2) секступоль хроматичности (CS);
- 3) резонансный секступоль (RS);
- 4) управляющий корректор, состоящий из горизонтального (DH) и вертикального диполей (DV).

Основные требования к корректирующим магнитам приведены в табл. 4.

Таблица 4. Основные требования к корректирующим магнитам

Тип магнита	Сила магнита	Эффективная длина, м	Время ввода тока, с
QM	1.8 Т/м	0.65	2.25
SM	60 Т/м ²	0.65	2.18
OM	767 Т/м ³	0.65	2.24
CS	130 Т/м ²	0.78	0.208
RS	325 Т/м ²	1	0.5
DH, DV	0.5 Т	0.65	2.27

Предполагается, что корректирующие магниты будут иметь индивидуальное питание, а для секступолей хроматичности возможно последовательное соединение четырех магнитов. Требования к качеству поля еще не сформулированы, однако для расчетов и оптимизации геометрии мы зафиксировали, что изменение первой низшей интегральной нелинейности поля должно быть в пределах 2×10^{-4} и отклонения центрального поля в магните не должны превышать 0.2%.

Для изготовления обмотки будет использован сверхпроводящий кабель прямоугольной формы из 8 проволок, транспонированный с шагом 12 мм. Кабель будет изолирован тремя слоями полиимида пленки толщиной 25 мкм; поперечные размеры кабеля 0.6×1.63 мм². Для корректирующих магнитов необходимо разработать сверхпроводящую проволоку со следующими параметрами: диаметр проволоки 0.3 мм, диаметр и шаг скрутки NbTi-нитей равны 3 мкм и 3 мм соответственно; отношение Cu/сверхпроводник = 1,7; RRR > 70; J_C = 2.7 кА/мм² (5 Тл, 4,2 К). Провод будет иметь естественное оксидное покрытие.

В настоящее время проведены расчеты и происходит разработка чертежей корректирующих магнитов. Обмотки во всех магнитах будут слоевыми, причем магнитопровод (ярмо) будет непосредственно служить и бандажом для обмотки (рис. 8). Основные расчетные характеристики магнитов приведены в табл. 5.

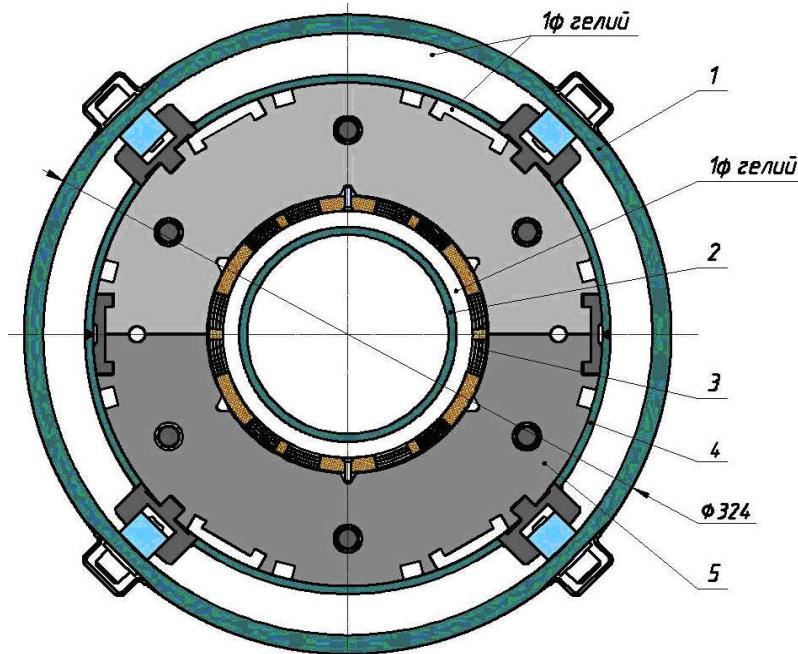


Рис. 8. Поперечное сечение сверхпроводящего мультипольного корректирующего магнита SIS300: 1 – обечайка гелиевого сосуда; 2 – пучковая труба; 3 – сверхпроводящая обмотка; 4 – оболочка из нержавеющей стали; 5 – магнитопровод; 1ф – однофазный гелий.

Таблица 5. Основные расчетные характеристики магнитов

Параметр	OM	SM	QM	CS	RS	DV	DH
Слоев в обмотке	1	1	1	2	4	2	2
Витков в слое	11	19	14	20	23	53	53
Внутренний диаметр обмотки, мм	125	129	132	125	125	125	132
Внутренний диаметр ярма, мм	141	141	141	135	142	142	142
Длина катушки, мм	800	725	650	800	1040	700	700
Рабочий ток, А	236	239	235	234	236	230	231
Максимальное поле в обмотке, Тл	0.32	0.42	0.35	0.89	1.69	1.42	1.42
Запасенная энергия, Дж/м	49	123	55	582	4358	1033	1126
Индуктивность, мГн/м	1.82	4.49	2.13	21.3	157	39.1	42.2
Магнитная сила, кН/м	0.19	0.57	0.31	3.2	22	9.2	11

5. Система криостатирования SIS300

5.1. Принципиальная схема криостатирования сверхпроводящих магнитов

Сверхпроводящие магниты ускорителя SIS300 будут работать со скоростью изменения магнитного поля на порядок величины выше, чем в сверхпроводящих магнитах

существующих ускорителей с магнитными полями выше 3 Тл (TEVATRON, HERA, RHIC, LHC). При таких скоростях изменения поля не только сверхпроводящие магниты влияют на криогенную систему (высокие динамические тепловыделения), но и сама криогенная система оказывает определённое воздействие на принятие оптимальных решений, закладываемых как в конструкцию магнитов, так и в проект ускорителя. С помощью криогенной системы необходимо не только охладить сверхпроводящие магниты до криогенных температур, но и обеспечить необходимый температурный запас (разность между критической и рабочей температурой обмотки).

Предварительный анализ криогенных систем сверхпроводящих ускорителей [8–12] показал, что для SIS300 предпочтительна схема с использованием однофазного потока гелия для охлаждения сверхпроводящих обмоток и двухфазного потока гелия для отвода тепла от однофазного потока и снятия стационарных теплопритоков.

Для SIS300, кольцо которого состоит из шести магнитных периодов и имеет длину примерно 1100 м [1], все магниты ускорителя предлагается разделить на две равные криогенные цепочки с отдельными потоками гелия. Принципиальная схема криостатирования цепочки сверхпроводящих магнитов показана на рис. 9. В этой схеме однофазный (сверхкритический) гелий, поступающий из гелиевой рефрижераторной станции, охлаждается в переохладителе и направляется в цепочку магнитов, где нагревается за счёт теплопритоков и тепловыделений и параллельно охлаждается в теплообменниках, расположенных в дипольных магнитах. На выходе из цепочки магнитов однофазный гелий дросселируется в вентиле Джоуля-Томсона CV1, в результате чего превращается в двухфазный гелий, который направляется в теплообменники дипольных магнитов и затем в переохладитель. В переохладителе двухфазный гелий сепарируется на пар и кипящую жидкость. Кипящий жидкий гелий используется для охлаждения однофазного гелия в теплообменнике переохладителя, пары гелия направляются в рефрижератор.

В табл. 6 представлены параметры гелиевых потоков схемы криостатирования цепочки сверхпроводящих магнитов.

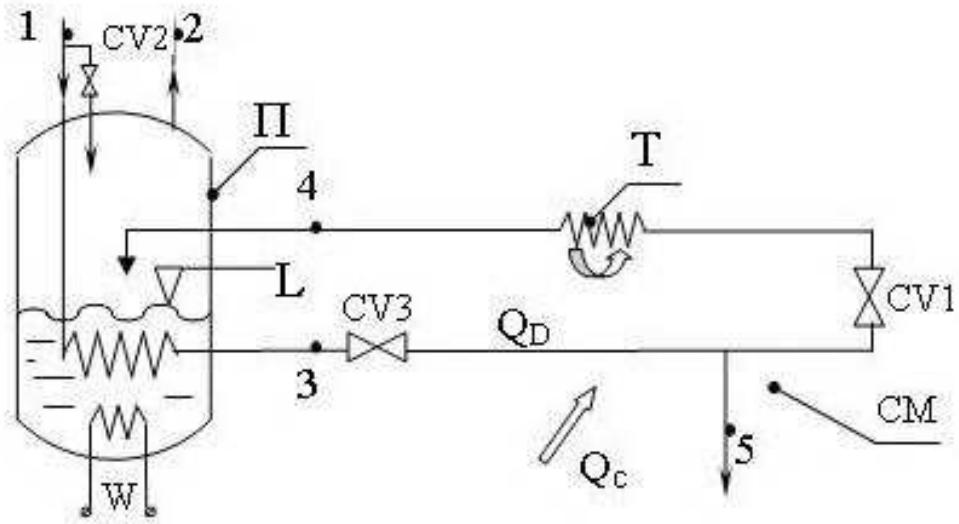


Рис. 9. Принципиальная схема криостатирования криогенной цепочки сверхпроводящих магнитов: П – переохладитель; CV1 – CV3 – вентили; L – уровнемер жидкого гелия; W – электронагреватель; CM – цепочка сверхпроводящих магнитов; Т – теплообменники дипольного магнита; QC – статические теплопритоки; QD – динамические тепловыделения.

Таблица 6. Параметры потоков схемы криостатирования цепочки магнитов SIS300

Основные гелиевые потоки системы криостатирования SIS300	Параметр	Точка на рис. 9
Давление сверхкритического гелия на входе в цепочку магнитов	3 бар	1
Температура сверхкритического гелия на входе в переохладитель цепочки магнитов	4,6 К	1
Температура сверхкритического гелия на входе в цепочку магнитов	4,35 К	3
Давление двухфазного гелия на выходе из цепочки магнитов	1,105 бар	4
Температура двухфазного гелия на выходе из цепочки магнитов	4,3 К	4
Паросодержание двухфазного гелия на выходе из цепочки магнитов	≤95%	4
Давление насыщенного пара на выходе из переохладителя	1,105 бар	2

Для устойчивого теплообмена между двухфазным и однофазным потоками гелия в теплообменниках дипольного магнита паросодержание двухфазного потока гелия на выходе из цепочки магнитов x_4 должно быть $\leq 0,95$. Балансовые уравнения для схемы (Рис. 9) при условии поддержания постоянного уровня жидкого гелия L вентилем CV1 и нулевого расхода потока на токовводы в точке 5: $G_1 \cdot i_1 + Q_D + Q_C = G_1 \cdot i_2$ и $G_1 \cdot i_3 + Q_D + Q_C = G_1 \cdot i_4$, где i – энтальпия гелиевого потока. Из данных уравнений находим: $i_4 = i_3 + i_2 - i_1$. Уравнение для i_4 показывает, что параметры потока на выходе из цепочки,

в том числе и его паросодержание в точке 4, при условии поддержания постоянного уровня жидкого гелия, не зависят от величины теплопритоков и тепловыделений. Они зависят только от входных и выходных параметров потоков в переохладителе (точки 1 и 2), которые обеспечиваются рефрижераторной станцией ускорителя. Для значений, приведенных в табл. 5, используя термодинамические свойства гелия [13], получаем паросодержание на выходе из цепочки $x_4=0,951$, что практически соответствует требованию $x_4 \leq 0,95$. В действительности, в связи с наличием некоторого расхода гелия на охлаждение токовводов (точка 5), паросодержание на выходе из магнитов будет ниже 0,95.

Это паросодержание можно регулировать, если в схему (рис. 9) ввести электронагреватель W. При мощностях электронагревателя 50; 100; 150; 200 Вт паросодержание обратного потока (точка 4), без учёта потока гелия на охлаждение токовводов, будет 0,93; 0,91; 0,89; 0,87 соответственно. Отсюда следует, что незначительным уменьшением холодопроизводительности системы (в пределах менее 1% от холодопроизводительности рефрижераторной станции) можно значительно уменьшить паросодержание двухфазного потока. Опыт эксплуатации гелиевых криогенных систем показывает, что наличие электрического нагревателя в сборнике жидкого гелия также существенно упрощает процесс автоматизированного управления криогенной системой в целом. При значительном изменении тепловой нагрузки (смене режимов работы магнитов, например, перерыве в их работе) расход гелия регулируется вентилем CV3.

5.2. Тепловая нагрузка на криогенную систему SIS300

В табл. 7 представлены типы сверхпроводящих магнитов SIS300 и их некоторые параметры [1, 7, 14]. Дипольные магниты и мультипольный корректирующий магнит имеют отдельные криостаты. Квадрупольные и корректирующие магниты в различных комбинациях устанавливаются в одном криостате, образуя три типа криомодулей: CS + квадруполь (24), управляющий корректор + квадруполь (48), управляющий корректор + квадруполь + RS (12), в скобках указано количество криомодулей.

Рассмотрим тепловую нагрузку на температурный уровень 4,3 К системы криостирования. В табл. 8 представлены результаты расчета статических теплопритоков (теплопритоки из окружающей среды) к гелиевому сосуду и динамических тепловыде-

лений в длинных и коротких дипольных магнитах, в криогенных модулях (усредненные) и в мультипольных корректирующих магнитах.

Таблица 7. Основные параметры сверхпроводящих магнитов SIS300

Тип магнита	Количество магнитов, шт	Вес магнита, т	Длина обмотки, м	Внутренний диаметр обмотки, мм
Диполь длинный	49	11	7,8	100
Диполь короткий	13	6	4	100
Квадруполь	86	0,62	1	125
RS	12	0,45	1	125
CS	24	0,38	0,75	125
Управляющий корректор	78	0,32	0,75	125
Мультипольный корректор	12	0,3	0,75	125

Таблица 8. Теплопритоки и тепловыделения в магнитах SIS300

Тепловыделения	Тепловая нагрузка, Вт			
	Длинный диполь	Короткий диполь	Криомодуль	Мультиполь
Динамические тепловыделения	29,7	14,8	3	0,002
Статические теплопритоки	7,3	3,6	4	2
Суммарные на магнит (модуль)	37	18,4	7	2,002
На все магниты (модули)	1813	239	602	24

Как следует из табл. 8, дипольные магниты имеют наибольшие тепловыделения, поэтому в верхней части их магнитопровода находится теплообменник, в котором часть прямого потока однофазного гелия охлаждается обратным потоком двухфазного гелия (рис. 10). На входе в дипольный магнит поток однофазного гелия делится на две примерно равные части, одна из которых проходит в кольцевом канале между обмоткой и пучковой трубой, охлаждая обмотку, а вторая часть охлаждается потоком двухфазного гелия в обводном канале железного ярма. На выходе из магнита эти части однофазного потока соединяются. Таким образом, в каждом дипольном магните происходит отбор тепла от сверхпроводящей обмотки однофазным гелием и отбор тепла от однофазного гелия гелием двухфазным. Длина и тепловыделения квадрупольных и корректирующих магнитов значительно меньше по сравнению с аналогичными

величинами дипольных магнитов, поэтому в их конструкциях не предусмотрено охлаждение однофазного потока двухфазным.

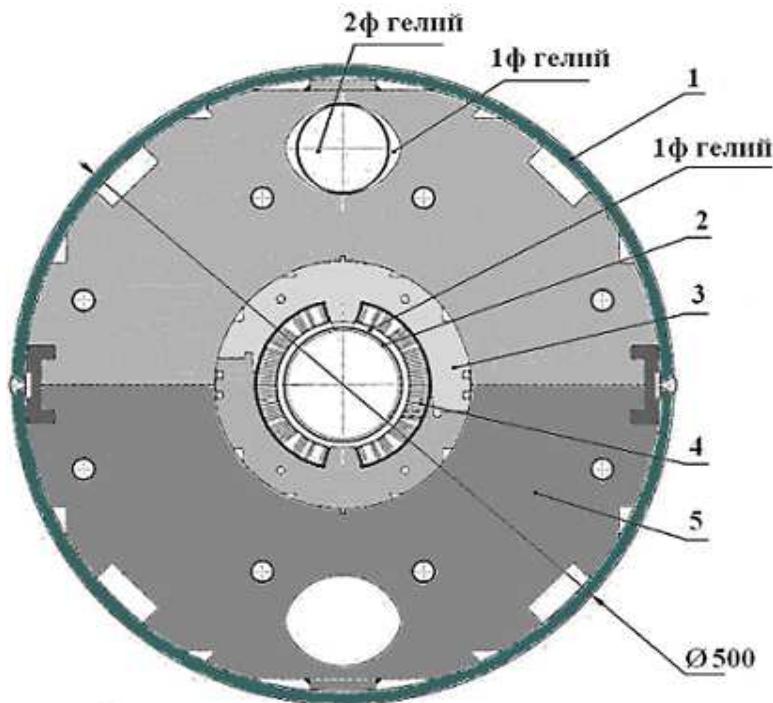


Рис. 10. Поперечное сечение холдного блока сверхпроводящего дипольного магнита ускорителя SIS300: 1 – корпус гелиевого сосуда; 2 – пучковая труба; 3 – бандаж из нержавеющей стали; 4 – сверхпроводящая обмотка; 5 – железное ярмо; 1ф – однофазный гелий; 2ф – двухфазный гелий.

В табл. 9 показана суммарная тепловая нагрузка на температурный уровень 4,3 К системы криостатирования SIS300. В этой таблице учтены дополнительные теплопритоки и тепловыделения в конструктивных элементах SIS300 (тоководах, трубопроводах, сверхпроводящих шинах). Как следует из этой таблицы, динамические тепловыделения при работе ускорителя составляют 68% от суммарной тепловой нагрузки.

Таблица 9. Тепловая нагрузка на температурный уровень 4,3 К ускорителя SIS300

Динамические тепловыделения	2472 Вт
Тепловыделения от экранирующих токов в пучковой трубе	450 Вт
Статические теплопритоки	1367 Вт
Суммарная тепловая нагрузка	4289 Вт

5.3. Тепловая нагрузка на криогенную систему SIS300

Как показывает опыт, температурный запас (разность между рабочей и критической температурой обмотки) должен быть около 1 градуса, что обеспечивает стабильную работу сверхпроводящего магнита, работающего в ускорителе. Наиболее нагруженные по тепловыделениям и теплопритокам сверхпроводящие дипольные магниты имеют минимальное значение критической температуры в цикле SIS300 равное 5,7 К [14], в остальных магнитах критическая температура выше 6 К [7]. Разность температур обмотки диполя и однофазного гелия в цикле SIS300 около 0,1 К [14]. Поэтому максимальная температура однофазного гелия, охлаждающего сверхпроводящую обмотку дипольного магнита, должна быть около 4,6 К. Для криогенной цепочки, состоящей из трех одинаковых магнитных структур (рис. 11), было рассчитано температурное поле однофазного потока по длине цепочки.

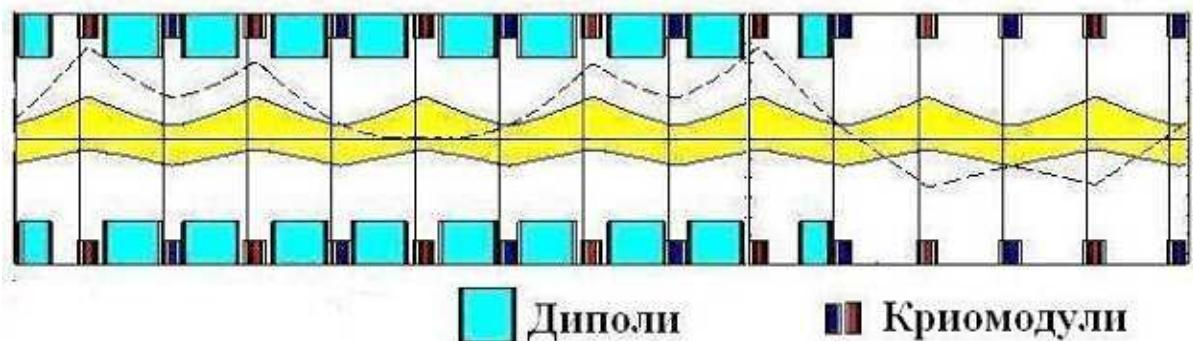


Рис. 11. Структура магнитного периода ускорителя SIS300 (1/3 цепочки).

При расчете использовались следующие уравнения теплопередачи и энергетического баланса:

$$c_p G_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial x} \right) = (\alpha \Pi)_1 (T_1 - T_{2\Phi}) + Q_1(x), \quad c_p G_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial x} \right) = Q_2(x), \quad G = Q_{\sum} / 2(i_2 - i_1),$$

где x – координата вдоль цепочки; $T_{2\Phi}$ – температура двухфазного гелия; T_1 и T_2 – температура однофазного гелия соответственно в обводном и кольцевом каналах дипольного магнита; Q_1 и Q_2 – плотность тепловыделений, снимаемых гелием в этих каналах; G_1 и G_2 – расход однофазного гелия в соответствующих каналах; $G = G_1 + G_2$; c_p – теплоемкость однофазного гелия; $(\alpha \Pi)_1$ – теплопередача от однофазного

гелия к двухфазному гелию в обводном канале; Q_{Σ} – суммарная тепловая нагрузка ускорителя SIS300; i_2, i_1 – энталпии гелиевых потоков согласно рис. 9.

Результаты расчёта изменения температуры однофазного гелия вдоль криогенной цепочки, состоящей из трех структур, и тепла, отводимого теплообменниками, размещёнными только в дипольных магнитах, при условии $G_1 = G_2$, показали, что в первом диполе второй и третьей магнитной структуры температура однофазного гелия около 4,7 К, при этом температурный запас диполя будет около 0.9 К. В связи с этим было решено ввести в криогенную цепочку два дополнительных теплообменника однофазного и двухфазного гелиевых потоков в конце первой и второй магнитной структуры между предпоследним и последним криомодулями, где для этого есть место. Изменение температуры однофазного гелия вдоль криогенной цепочки в этом случае приведено на рис. 12. Как следует из этого рисунка, максимальная температура однофазного гелия в дипольных магнитах при наличии дополнительных теплообменников в криогенной цепочке составляет 4,6 К, что обеспечивает условие стабильной работы дипольных магнитов, температурный запас диполя будет около 1 К.

Для равенства расходов однофазного гелия в кольцевом и обводном каналах ($G_2/G=0,5$) необходимо обеспечить равенство гидравлических сопротивлений в данных каналах, что трудно реализовать как при конструировании, так и при изготовлении магнитов. Поэтому проведено исследование зависимости максимальной температуры однофазного потока на выходе из дипольных магнитов от отношения G_2/G для криогенной цепочки с двумя дополнительными теплообменниками. Оно показало, что в достаточно широких пределах $0.4 < G_2/G < 0.6$ максимальная температура однофазного гелия на выходе из дипольных магнитов практически не меняется. Следовательно, нет необходимости достигать равенства вышеуказанных расходов, что упрощает процесс изготовления магнитов и важно при их серийном производстве.

Проведенные исследования позволили найти необходимое решение схемы криостатирования сверхпроводящих быстроциклических магнитов ускорителя SIS300 и оптимизировать параметры этой схемы. В соответствии с конструкцией магнитов и их режимом работы определены тепловые нагрузки на жидкий гелий и способы регулировки производительности системы криостатирования.

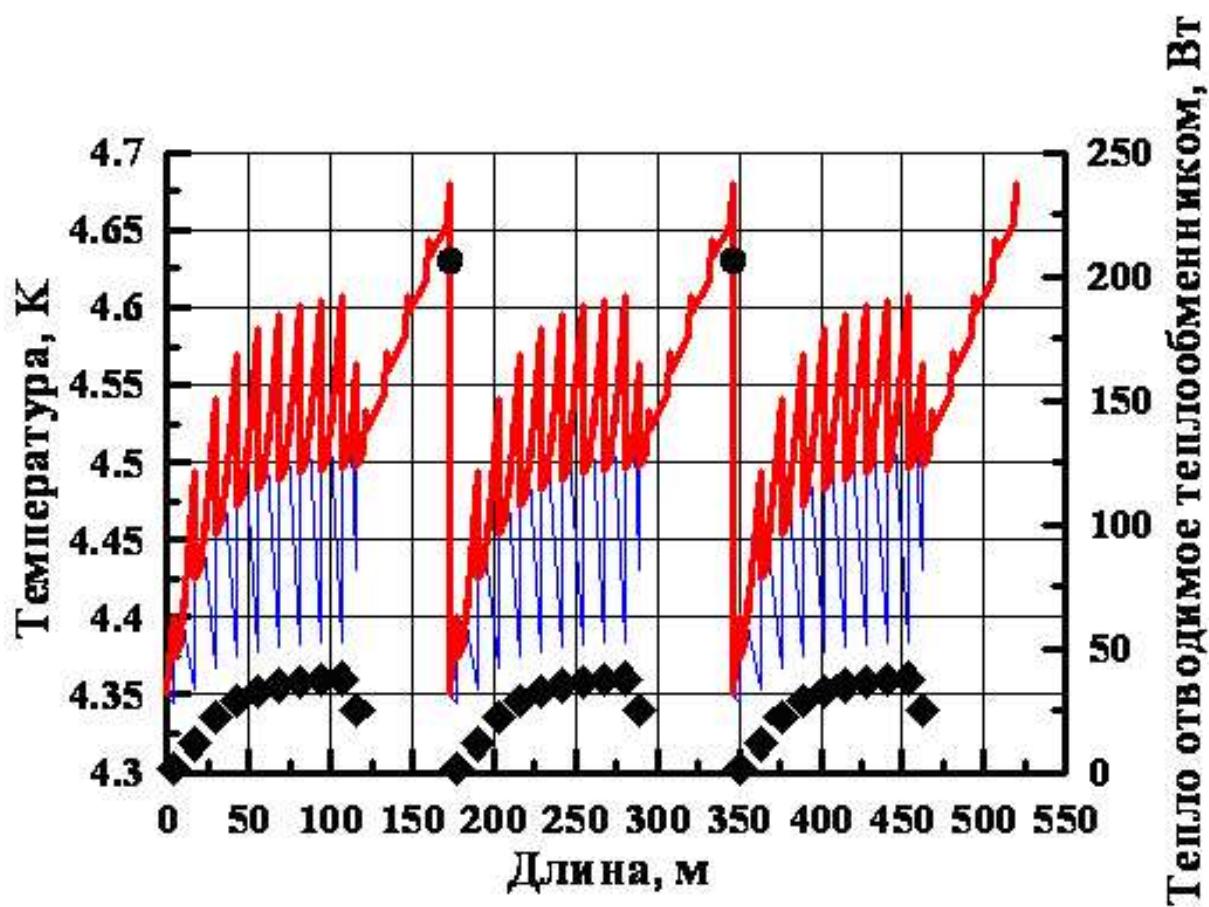


Рис. 12. Изменение температуры однофазного гелия в кольцевом канале (толстая линия) и в обводном канале дипольных магнитов (тонкая линия), а также тепло, отводимое в теплообменниках диполей (прямоугольный маркер) и дополнительных теплообменниках (круглый маркер) вдоль криогенной цепочки сверхпроводящих магнитов ускорителя SIS300.

Заключение

Задачами ГНЦ ИФВЭ и других предприятий России, участвующих в проекте SIS300, являются:

- создание быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов, позволяющих существенно увеличить энергию и среднюю по времени интенсивность пучков частиц ускорителя;

- разработка системы криостатирования ускорителя с быстроциклирующими сверхпроводящими магнитами, позволяющей эффективно отводить повышенные динамические тепловыделения в этих магнитах.

Разработка новых технологий, материалов и конструктивных решений позволила ГНЦ ИФВЭ создать и успешно испытать в 2008 году быстроциклирующий сверхпроводящий модельный дипольный магнит SIS300, который достиг значения магнитного поля 6.8 Тл со скоростью изменения поля 1.15 Тл/с, что выше существующих в мире аналогов.

В 2010 году завершена разработка и изготовление прототипа быстроциклирующего сверхпроводящего квадрупольного магнита SIS300, в 2011 году планируется провести его испытания, разработать оснастку для изготовления корректирующих магнитов SIS300.

Разработанная схема криостатирования позволит обеспечить стабильную работу быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов SIS300 в различных режимах работы этого ускорителя.

Работа выполнена за счет средств по государственному контракту с корпорацией РОСАТОМ № Н.4е.45.03.10.1027 от 15 января 2010 года.

Список литературы

- [1] FAIR Baseline Technical Report, Volume 2, Accelerator and Scientific Infrastructure, March 2006, <http://www.gsi.de/fair/reports/btr.html>
- [2] L. Tkachenko, S. Kozub, A. Tchikilev, V. Zubko. “Geometry Modernization of a Dipole Magnet for the SIS300”. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 18, Issue 2, pp. 264-267, August, 2007.
- [3] S. Kozub, I. Bogdanov, V. Pokrovsky et al. “SIS 300 Dipole Model”. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, V20, N3, June 2010, pp. 200- 203.
- [4] J. Kaugerts, G. Moritz, M. Wilson et al. “Cable Design for FAIR SIS 300”. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, no. 2, pp. 1477-1480, Jun. 2007.

- [5] В.И. Балбеков, Л.М. Ткаченко. "Оптимизация лобовых частей СП-диполей УНК". – Препринт ИФВЭ 82-167, Серпухов, 1982.
- [6] Tkachenko L., Bogdanov I., Kozub S. et al. Development of Quadrupole, Steering and Corrector Magnets for the SIS 300. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, V20, N3, June 2010, pp. 159- 163.
- [7] L. Tkachenko, S. Kozub, P. Shcherbakov, V. Sytnik, V. Zubko. "Analysis of the Factors Affecting Field Quality and Heat Releases of the Quadrupole Magnet for the SIS 300". Presented at ASC-2010, Washington, USA, August, 2010.
- [8] Ageyev A.I., Myznikov K.P., Shamichev A.N. et al. Development of Cryogenic System for UNK, Proc. Workshop on Superconducting Magnets and Cryogenics, BNL, Upton, N.Y., 1986, p. 276-279.
- [9] Geynisman M.G., Norris B.L., Makara J.N., Theilacker J.C. et al. Cryogenic System for the Tevatron. NIFS-Proc-28, 1996, p. 53-56, Tokio, Japan.
- [10] Lierl H., Wolff S. Superconducting Magnet and Cryogenic System of HERA. Review article in Japanese Cryogenic Engineering (Teion Kogaku), Vol. 31, No.7 (1996), p. 101-113.
- [11] Агапов. Н.Н. Криогенные технологии в сверхпроводящем ускорителе релятивистских ядер – НУКЛОТРОНе. – «Физика элементарных частиц и атомного ядра», 1999, том 30, выпуск 3, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна.
- [12] Lebrun P. Cryogenic Refrigeration for the LHC, CERN, Geneva, Switzerland, MaTeFu Spring Training School, Cadarache, 5-9 April 2009.
- [13] McCarty R. D. Provisional Thermodynamic Functions for Helium 4 for Temperatures from 2 to 1500 K with Pressures to 100 MN/m² (1000 Atmospheres), NBS REPORT 9762, August 1, 1970.
- [14] Alessandria F., Angius S., Bellomo G. et al. Technical Design Report of a Superconducting Model Dipole for FAIR SIS 300, INFN/TC-09/4, Laboratori Nazionali di Frascati, May 15, 2009.

Рукопись поступила 23 ноября 2010 г.

А.И. Агеев и др.

Разработка быстроциклических сверхпроводящих магнитов
и криогенной системы ускорителя SIS300.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 26.11.2010. Формат 60 × 84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 1, 8. Уч.-изд.л. 2,78. Тираж 80. Заказ 12. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142281, Протвино Московской обл.

нdex 3649

ПРЕПРИНТ 2010-13, ИФВЭ, 2010
