

УСКОРИТЕЛЬ СПИН - СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СИНХРОТРОН
С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ, ФОРМИРУЕМЫМ ЖЕЛЕЗОМ

И.А.Шелаев

Лаборатория высоких энергий
Объединенный институт ядерных исследований
Дубна, 141980

Аннотация

Приведены основные параметры и конструктивные особенности модельного сверхпроводящего синхротрона СПИН, рассчитанного на ускорение протонов до энергии 1,5 ГэВ и тяжелых ионов.

Сообщается о состоянии работ на ускорителе.

Введение

Работы по использованию сверхпроводимости ведутся в ЛВЭ ОИЯИ в течение последних 10 лет. В ходе этих работ создан 1,5 ГэВ модельный СП синхротрон СПИН /СП инжектор нуклотрона/ и подготовлен технический проект нуклотрона-СП синхротрона с энергией протонов до 16 ГэВ.

В этих ускорителях используются СП магниты типа Дубна, характеризующиеся тем, что магнитное поле в них выбрано на уровне поля насыщения железа, т.е. порядка 2Т. Такой выбор определился стремлением существенно уменьшить стоимость изготовления магнитов. В обычных теплых магнитах, например, магнитах SPS /ЦЕРН/, имеющих апертуру 52 мм и максимальное поле 1,8 Т, расходуется примерно 2 т/м стали и 300 кг/м меди. При этом средне-квадратичная плотность тока в обмотке равна 3,5 А/мм², сверхпроводимость же позволяет поднять плотность тока до 600 А/мм² и выше. Благодаря этому вес обмотки, имеющей те же ампер-витки, уменьшается почти в 120 раз, что, в свою очередь, позволяет в 20 раз снизить вес магнитопровода. Но сверхпроводимость существенно усложняет магнитную систему ускорителя, так как ее применение сопряжено с необходимостью изготовления помимо обычной вакуумной камеры еще двух /и более/ вакуумных объемов - гелиевый сосуд, теплый вакуумный кожух, азотный экран, а в последних проектах СП магнитов еще и экран с температурой 20 К. Отсюда видно, что стоимость изготовления СП магнитной системы может быть ниже стоимости тепловой, если стоимость изготовления этих объемов и криогенного рефрижератора компенсируется достижимой экономией материалов, необходимых для тепловой магнитной системы.

Многие исследователи считают отличительной чертой СП магнитов - возможность получения высоких /4Т и более/ полей. С переходом к таким полям необходимо почти в 10 раз увеличить объем обмотки /вдвое для увеличения поля, еще почти вдвое - за счет снижения вклада железа в величину поля, так как для устранения эффектов насыщения железа последнее необходимо отодвигать от обмотки, и еще раз вдвое - за счет снижения критической плотности тока в сверхпроводнике с ростом поля/, а также решить целый ряд технологических проблем, характерных для т.н. безжелезных магнитов. Среди них отметим неизбежность криволинейной формы обмотки, необходимость изготовления немагнитного силового банджа и предварительное механическое напряжение обмотки, позволяющее сохранить ее геометрию при возбуждении током, и др. Решение этих проблем значительно усложняет технологию изготовления СП магнита и повышает его стоимость. По оценкам переход к полям 4 Т и выше пока экономически оправдан только в таких устройствах, где лишь высокий уровень поля может дать новый физический результат. В ускорителе же на заданную энергию стоимость

здания /тоннеля/ обратно пропорциональна величине магнитного поля, а стоимость магнита растет пропорционально полю и быстрее с учетом сказанного выше. Поэтому полная стоимость установки имеет минимум, соответствующий оптимальному полю. Разумеется, конкретное значение этого поля определяется реальным соотношением цен и может быть различным в разных странах. Однако, с учетом современной тенденции строительства pp - коллайдеров - две идентичные магнитные системы в одном здании - оптимальная величина поля скорее ближе к 2 Т, чем к 4 Т.

Магнитная система СПИНа

СПИН представляет собой синхротрон с разделенными функциями и сверхпроводящей магнитной системой¹. Его основные параметры приведены в таблице 1, а схема представлена на рис. 1 и 1а. Структура магнитной системы СПИНа включает два суперпериода, каждый суперпериод содержит 12 регулярных 1,5-м ФОДО периода и один 9-м согласованный промежуток с набегом фазы 2π-π². Длина согласованных промежутков достаточна для размещения в них оборудования ввода и вывода пучка в одном промежутке и ускорения - в другом. Согласование промежутков достигается уменьшением длины Ф-линзы соседнего периода и установкой в промежутке двух пар Ф и Д согласующихся квадруполов.

Таблица 1

Магнитная жесткость, Т·м	7,51
Периметр, м	54,0
Энергия протонов, ГэВ	1,50
Энергия ионов или ядер, МэВ/нуклон	2÷526
Интенсивность частиц с зарядом Z, частиц/имп.	1,5·10 ¹¹ /Z
Частота повторения циклов ускорения, Гц	0,14

Регулярный период содержит два 42-см дипольных магнита, две 15-см квадрупольные линзы и четыре 9-см прямолинейных промежутка. В них размещаются конфликтные соединения камер соседних периодов, вертикальный /или горизонтальный/ пикап-электрод, соединение вакуумной камеры с теплым магниторазрядным насосом /или датчиком давления/ и есть возможность для установки безжелезных мультипольных СП корректоров магнитного поля. Все магнитные элементы одного периода с помещенной в них вакуумной камерой установлены на общем дюралюминиевом ложементе, обеспечивающем расчетное взаимное положение магнитных элементов с точностью не хуже 0,05 мм. Основные параметры магнитов и линз приведены в табл. 2, а технология их изготовления подробно изложена в работах^{1,3}.

Плоский СП кабель резерфордовского типа был весь изготовлен в ЛВЭ из стандартного СП провода диаметром 0,5 мм, содержащего 1045 ниобий-титановых нитей диаметром 10 мкм. Регулярные линзы Д имеют такие же параметры, что и приведенные во второй колонке табл. 2 линзы Ф, а широкая сторона апертуры линз Д ориентирована вертикаль-

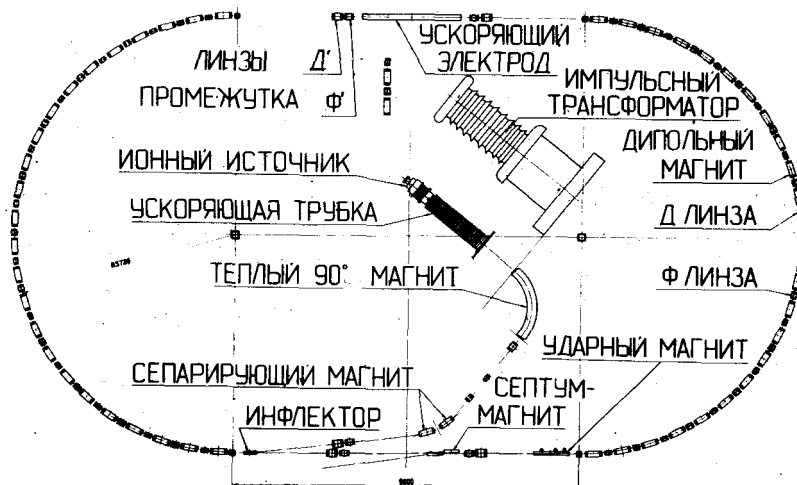


Рис. 1. Общая схема ускорителя СПИН.

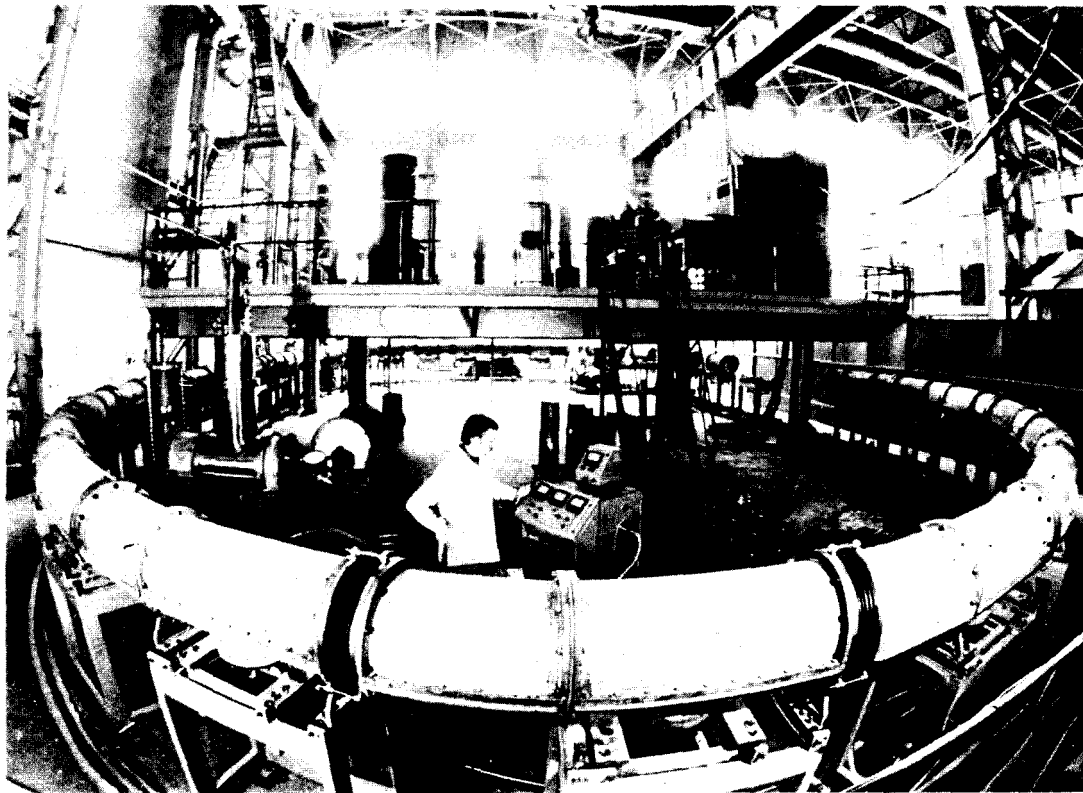


Рис. 1а. Общий вид ускорителя СПИН.

	Таблица 2	
Магнитное поле, Т	2,27	-
Градиент, Т/м	-	87,5
Номинальный ток обмотки, А	2070	1630
Физическая длина обмотки, м	0,42	0,15
Размеры ярма /ширина x высота/, см ²	15x14	15x11
Апертура, мм ²	55x55	62x32
Число витков основной обмотки	48	112
Число проводов в СП кабеле	15	13
Индуктивность, мГн	1,5	0,67
Запасенная энергия, кДж	3,3	0,87
Среднеквадратичный разброс длины, 10 ⁻⁴	3,0	13,3
Вес магнита, кг	50,0	10,0

но. Ф и Д линзы согласованного промежутка имеют квадратную апертуру со стороной 79 и 99 мм, соответственно, длину 0,24 и 0,28 м и рассчитаны на максимальный градиент 68 и 52 Т/м так, что величина поля на однослойной обмотке этих линз не превышает 3,6 Т, как и в регулярных линзах.

Расчет огибающей пучка с учетом измеренных эффективных длин магнитов и линз показал, что при различных расстановках магнитных элементов искажения замкнутой орбиты не превышают 5 мм, а рабочая точка на диаграмме бетатронных частот ($\nu_x = 7,3$; $\nu_y = 6,25$) может быть установлена подбором токов в Ф и Д линзах при их раздельном электрическом питании⁴. Поэтому был принят вариант расстановки магнитов в соответствии с их порядковым номером.

При установке периодов в кольце ускорителя вертикальное положение контролировалось нивелиром, радиальное — мерной проволокой и микроскопами, азимутальное — теодолитом. Среднеквадратичные ошибки в установке составили 0,1 мм по высоте и радиусу и 0,16 мм — по азимуту.

Помимо СП магнитов кольца ускоритель СПИН оборудован также измерительным периодом, содержащим два СП дипольных магнита и две квадрупольные линзы, и „5-м „холодным“ участком канала инжекции. В этом участке установлены две регулярные СП линзы, два поворотных магнита, обеспечивающих поворот пучка в горизонтальной плоскости на угол 41° , и две линзы согласованного промежутка.

В теплой части канала инжекции установлены квадрупольная линза и 90° поворотный магнит с радиусом 1,25 м для перевода вертикального пучка инжектора в горизонтальную плоскость ускорителя.

Другие системы ускорителя

Инжектором СПИНа служит импульсный электростатический ускоритель с потенциалом 0,75 МВ, размещенный внутри кольца синхротрона на специальной платформе. Однооборотный ввод пучка осуществляется электростатическим инжектором с потенциалом 14 кВ.

Ускорение пучка осуществляется 3-м пролетным электродом, установленным в центре согласованного промежутка. Эффективность использования напряжения на таком электроде в режиме первой гармоники равна 35%. Для питания электрода используется широкодиапазонный (0,18–5,12 МГц) транзисторный генератор мощностью 400 Вт, развивающий на электроде напряжение амплитудой 250 В.

Питание СП магнитов ускорителя в холодном режиме будет осуществляться от трех источников тока типа ИСТР-2500/48, управляемых мини-ЭВМ типа МЕРА-60 по трем синхронным программам. Программы допускают независимое управление амплитудой тока в каждом источнике.

Гелиевый криостат типа кипящей ванны выполнен общим для всего ускорителя, включая измерительный период и холодную часть канала инжекции, и повторяет периодичность СП магнитной системы. Криостат регулярного периода имеет длину 1,5 м и представляет собой цилиндр диаметром 0,28 м, изготовленный из 2-мм листовой нержавеющей стали. Для удобства монтажа и ремонта размещенного в криостате оборудования последний разрезан по образующим в медианной плоскости. На конце каждого регулярного периода криостат снабжен сильфоном того же диаметра. В центре криостат периода поддерживается опорой в виде цилиндрического лабиринта, внутренний цилиндр которого изготовлен из стеклотекстолитовой трубы диаметром 0,145 м и стенкой толщиной 4 мм. Остальные два цилиндра опоры изготовлены из нержавеющей стали. На теплом конце опоры оборудована юстировочным устройством, позволяющим корректировать пространственное положение криостата в рабочих условиях. Уплотнение отдельных частей криостата выполнено сварными швами многократного пользования. Теплоизоляция гелиевой ванны осуществляется многослойной суперизоляцией и теплым вакуумным кожухом, общим для всего ускорителя. Криостаты прямолинейных промежутков изготовлены аналогично криостатам регулярных периодов. Общая длина гелиевой ванны 64 м, а ее объем 4 м³, объем жидкого гелия около 1 м³. Восемь двухполюсных 3 кА, охлаждаемых газообразным гелием, тоководов размещены попарно на концах согласованных промежутков. Там же размещаются выводы контрольных и измерительных цепей. Для питания СП магнитов канала инжекции криостат ускорителя оборудован в этом районе 6 парами коаксиальных тоководов с током до 300 А. Для защиты криостата от избыточного давления в аварийных режимах последний оборудован 3 полноподъемными клапанами и 2 разрывными мембранами с проходным отверстием диаметром 50 мм, срабатывающими при повышенном давлении в криостате до 1,7 и 2,0 атм. Такие же мембраны установлены на теплых патрубках вакуумной камеры, соединяющих ее с магнито-

разрядными насосами. На теплом кожухе криостата имеется два сбрасываемых фланца диаметром 0,25 м.

Охлаждение и поддержание рабочей температуры криостата осуществляется с помощью криогенной гелиевой установки типа КГУ-1600/4,5⁵, находящейся на расстоянии 60 м от ускорителя. Установка имеет проектную холодопроизводительность 1750 Вт при одновременном получении 45 л/ч жидкого гелия. Удельный расход энергии в установке составляет 280 Вт/Вт. Такая высокая эффективность достигается применением каскада из трех последовательно включенных турбодетандеров, обеспечивающих охлаждение до 15 К, и поршневого парожидкостного детандера. Криогенная установка соединяется с ускорителем двумя криогенными магистралями с условным диаметром 25 мм в прямом потоке и 56 мм — в обратном. Магистрали имеют простейшую коаксиальную конструкцию без охлаждаемых экранов. Внутренние трубы изолированы 30 слоями металлизированного лавсана с прокладками из стеклотекстолита. Опоры стеклотекстолитовые. Общая протяженность магистралей примерно 160 м, измеренный суммарный теплоприток составляет 500 Вт.

Вакуумная камера СПИНа изготовлена из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм. В рабочих условиях камера всего ускорителя, включая часть канала инжекции, находится при температуре жидкого гелия. Холодная и теплая часть вакуумной камеры в канале инжекции разделяются быстродействующим механическим затвором, снижающим натекание остаточного газа из теплой части камеры в холодную. Соединение всех элементов камеры выполнено сварными, а на границах периодов — разъемными с медными прокладками. Электрически изолированные вводы в камеру выполнены с помощью металлокерамических изоляторов. При изготовлении камеры каждого периода проходили многочасовую вакуумную тренировку при температуре 450°C.

Состояние работ на ускорителе

На сегодня на ускорителе СПИН проведены две основные работы: получен режим циркуляции инжектируемого пучка и проведено охлаждение криостата ускорителя совместно с гелиевым рефрижератором до температуры жидкого гелия.

Эксперименты с пучком при комнатной температуре оказались полезными. Уже в опытах по получению первого оборота удалось установить, что полярность включения поворотного магнита в 18 периоде противоположна. Устранение этой ошибки монтажа потребовало совсем немного времени, т. к. гелиевый сосуд был открыт. Инжектировался пучок протонов интенсивностью 3–6 мА с энергией 510 КэВ, так как в силу ряда причин работа ускорительной трубки была устойчивой при этом потенциале. Этой энергии протонов соответствовало поле в дипольных магнитах напряженностью 312 Э и ток 28,5 А. При комнатной температуре в постоянном режиме рассеиваемая мощность одного СП магнита составила бы 530 Вт, поэтому для уменьшения средней мощности до уровня порядка 10 Вт были созданы три специальных высоковольтных источника, обеспечивающих работу магнитов и линз в импульсном режиме с фронтами нарастания и спада тока 0,15 с и длительностью плато 0,25 с, длительность паузы между импульсами 12 с.

Инжекция пучка проводилась спустя 80 мс после начала плато тока, здесь же включалось ВЧ напряжение на ускоряющем электроде. Синхронизация и программирование уровней тока осуществлялось ЭВМ. Подбором токов магнитов и линз находился режим, обеспечивающий циркуляцию пучка в течение наибольшего времени. При выключенном ВЧ напряжении время циркуляции пучка составляло 4–5 мс и определялось дебанчиванием пучка. С включенным ВЧ напряжением наблюдаемое время циркуляции составляло 150 мс, что соответствует примерно 3×10^4 оборотам пучка. Интенсивность пучка уменьшалась по экспоненциальному закону, что связано с рассеянием протонов столь низкой энергии на атомах остаточного газа.

Давление в камере ускорителя в этих экспериментах составляло 2×10^{-5} Па.

Выполненные эксперименты показали, что созданная магнитная система достаточно устойчива, и довольно жесткие допуски на изготовление и установку магнитов и линз выполнены, так как опыты проводились без каких-либо магнитных корректоров. Более того, перед установкой в кольцо 25% магнитов и линз прошли криогенные испытания при номинальном токе, в результате чего в ядре магнитов появились остаточные поля. Предварительные измерения показали, что остаточное поле ядра в магнитах данного типа имеет величину порядка 1 Э, что на уровне поля инжекции (312 Э) составляет заметную величину.

После выполнения сварочных работ на гелиевом криостате была проверена герметичность холодной части вакуумной камеры методом гелиевого мыла. Проверка показала, что в камере осталась гелиевая течь величиной порядка 1 нВт. Поиск и устранение столь малой течи требует доработки, поэтому должна быть проведена подготовка ускорителя к охлаждению. Гелиевая ванна после устранения замеченных течей была обернута 15 слоями односторонней суперизоляции. Собранный теплый вакуумный кожух, имеющий резиновые прокладки в соединениях его частей, откачивался двумя паромасляными насосами типа ВА-0,5 до давления 5×10^{-2} Па; объем кожуха 4,5 м³.

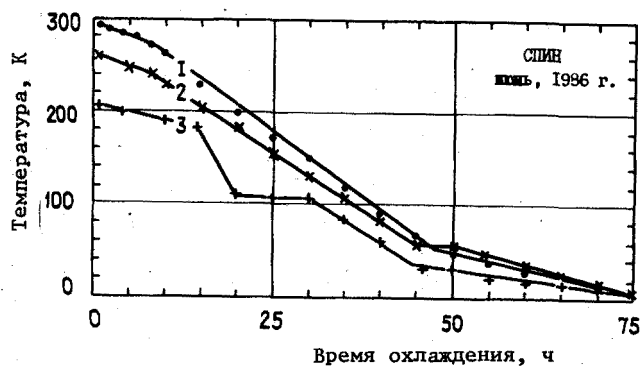


Рис. 2. Зависимость температуры криостата СПИИ (1) и рефрижератора (2,3) от времени.

На рис. 2 приведены температура прямого потока гелия 3 из рефрижератора в криостат СПИИ, обратного потока 2 и температуры 1 в характерной точке криостата в зависимости от времени. Температура в криостате измерялась с помощью 22 резистивных датчиков, расположенных равномерно по кольцу ускорителя и опрашиваемых ЭВМ каждые 2,5 мин. В начале цикла охлаждения работал только один компрессор и сжатый гелий охлаждался в азотной ванне рефрижератора. Через 32 ч работы в этом режиме были включены два турбодетандера в ступени предварительного охлаждения и второй компрессор. Спустя 25 ч

температура всех магнитов в криостате выравнивалась и достигла 35 К. В это время был включен третий парожидкостный турбодетандер, третий компрессор и вся установка КГУ-1600/4,5 была переведена в штатный режим. Через 18 ч или 75 ч с начала охлаждения в криостате СПИИ и сборнике рефрижератора начал накапливаться жидкий гелий со скоростью 40 л/ч., а магниты и линзы ускорителя перешли в сверхпроводящее состояние. Таким образом, средняя скорость охлаждения ускорителя СПИИ (общая холодная масса 5,8 т), рефрижератора и криомагистралей составила 4 К/ч и определялась максимальным давлением в криостате, принятым в этом эксперименте 0,4 атм. Из баланса теплопритоков и мощности рефрижератора в этом режиме следует, что теплоприток криостата СПИИ составляет 700-750 Вт, что примерно в 2 раза выше расчетного⁶.

Давление в теплом кожухе криостата в зависимости от температуры показано на рис. 3. Видно, что при температуре ниже 40 К началась криоткачка воздуха, поступаю-

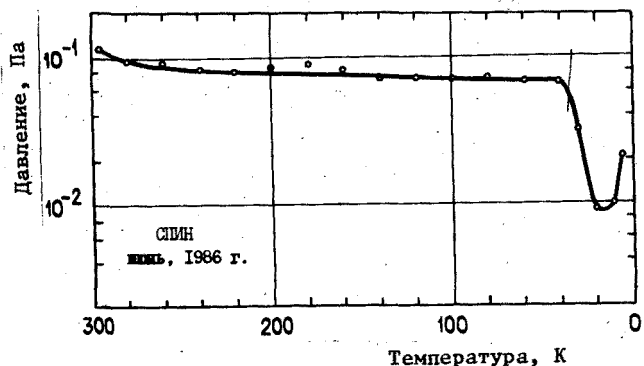


Рис. 3. Зависимость давления в теплом кожухе от температуры.

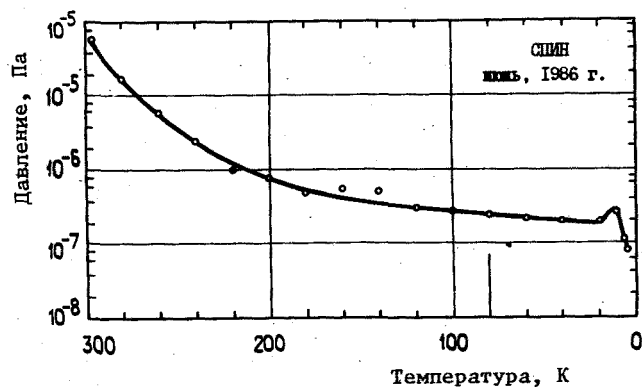


Рис. 4. Зависимость давления в вакуумной камере от температуры.

щего в теплый кожух через воздушную течь. При появлении жидкого гелия в криостате давление увеличилось в 2 раза, что указывает на существование микротечей в гелиевом сосуде.

Зависимость давления в вакуумной камере от температуры показана на рис. 4. Одновременный контроль за гелиевым фоном в камере показывает, что в районе температур 5-7 К фон, до этого медленно возраставший, резко уменьшился с одновременным уменьшением давления в камере ускорителя. Это указывает на то, что поступающий через имеющуюся в камере течь гелий при температуре 5 К начал криосорбироваться поверхностью камеры. Хотя полученное предельное давление 8×10^{-8} Па несколько выше, чем наблюдавшееся в предыдущих экспериментах с подобной камерой⁷, однако это давление достаточно для ускорения ионов в синхротронном режиме без потерь из-за перезарядки на остаточном газе.

Заключение

Выполненные на синхротроне СПИИ эксперименты показывают, что в целом ускоритель получился работоспособным. Сейчас завершаются работы по подготовке и опробованию электрических схем эвакуации запасенной в СП магнитах энергии и в ближайшее время будет проведена наладка всех систем ускорителя с пучком при криогенных температурах.

Проектирование и изготовление ускорителя СПИИ выполнено сотрудниками Лаборатории высоких энергий, всем участникам этой работы автор выражает свою глубокую благодарность.

Литература

1. Шелаев И.А. и др. Проектные параметры модельного сверхпроводящего синхротрона ОИЯИ.-Препринт ОИЯИ, Р9-83-582.-Дубна, 1983.
2. Шелаев И.А., Юдин И.П. Согласование прямолинейного промежутка синхротрона.-Препринт ОИЯИ, 9-11745.-Дубна, 1978.
3. Аверичев С.А. и др. Некоторые характеристики импульсных сверхпроводящих магнитов типа "оконная рама" для создания полей до 2,5 Т.-Препринт ОИЯИ, Р8-11700.-Дубна, 1978.
4. Борисовская З.В. и др. Влияние разбросов характеристик магнитов и линз на параметры траекторий частиц в установке "СПИН".-Сообщение ОИЯИ, 9-84-522.-Дубна, 1984.
5. Пронько В.Г., Краковский Б.Д. ОИЯИ, Р18-12147, с.347, Дубна, 1979.
6. Шелаев И.А. и др. Криогенная система сверхпроводящего синхротрона СПИН.-Препринт ОИЯИ, Р9-85-593.-Дубна, 1985.
7. Алфеев В.С. и др. Моделирование "холодной" вакуумной камеры сверхпроводящего синхротрона.-Препринт ОИЯИ, Р9-81-339.-Дубна, 1981.

Discussion

К.П.Мызников. Какой способ охлаждения вы применяете?

И.А.Шелаев. Ускоритель охлаждался следующим образом. Жидкий гелий подавался в середину криостата и по трубкам поступал в одну и в другую половины криостата. Из трубок диаметром 15 мм гелий вытекал в криостат, а затем, газообразный, он возвращался примерно в ту же точку, откуда подавался, и по холодному обратному гелиепроводу поступал в криогенную установку. То есть это погружно-заливной вариант охлаждения.

К.П.Мызников. Каков объем гелия, который требуется в этом случае?

И.А.Шелаев. Для полной заливки всех магнитов требуется около 1000 л гелия.

К.П.Мызников. Можно ли такой способ применить для больших машин?

И.А.Шелаев. Этот способ применим только для неболь-

ших машин. По-видимому, данная установка - самая большая машина с охлаждением ванным способом.

К.П.Мызников. Как решается вопрос эвакуации гелия при переходах в нормальное состояние?

И.А.Шелаев. На случай аварийных ситуаций криостат снабжен разрывными мембранами и полноподъемными клапанами для того, чтобы отводить газообразный гелий или в обратный поток, или, в крайнем случае, в атмосферу.

W.Middelkoop. The machine is installed in an open hall and I don't see any provisions for shielding. Which beam intensity do you expect to accelerate in it?

I.A.Shelaev. 10^{11} particles, but the shielding will be built for the control room.

К.П.Мызников. Вы назвали цифру статического теплопритока: 750 Вт. Сколько приходится на 1 м магнита?

И.А.Шелаев. Примерно 10 Вт/м. Полная длина магнитов составляет 64 м.

К.П.Мызников. Это гигантская величина! И в то же время вы не применяете азотного экрана. Что, вы стремитесь получить как можно большие статические теплопритоки?

И.А.Шелаев. Для того чтобы получить максимальные статические теплопритоки, достаточно открыть теплый кожух, тогда они, действительно, будут наибольшими. Мы не стремились получить большие теплопритоки, но в данном случае мы хотим быстрее сделать этот модельный синхротрон, не ставя целью оптимизировать криогенную систему.

К.П.Мызников. Следовательно, можно сделать вывод, что такая конструкция совершенно неприемлема для действующих машин?

И.А.Шелаев. В этом криостате предусмотрена возможность установки азотного экрана, тогда теплопритоки существенно снизятся, примерно в 5 раз. Но в данном случае экран не поставлен.

А.Г.Чилингаров. Предусмотрены ли в ускорителе каналы вывода пучка, можно ли ставить какие-либо эксперементы?

И.А.Шелаев. Да, в машине предусмотрена система быстрого вывода пучка.