

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-96-345

На правах рукописи
УДК 621.384.634
+ 621.59

M-353

МАТЮШЕВСКИЙ
Евгений Александрович

**НЕКОТОРЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСКОРИТЕЛЕЙ ОИЯИ**

Специальность: 01.04.13 — электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1996

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор

Шелаев Игорь Александрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор

Матора Иван Максимович

доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Козлов Святослав Иванович

Ведущая организация - Государственный Научный Центр РФ
Институт физики высоких энергий

Защита состоится "14" XI 1996г. в 12 часов

на заседании диссертационного совета Д-047.01.02 в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области, Лаборатория высоких энергий ОИЯИ, конференц-зал ЛВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан

"9" X 1996 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Лихачев М.Ф. Лихачев М.Ф.

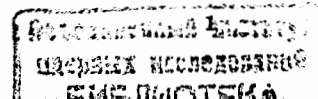
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Проводимые в Лаборатории высоких энергий исследования в области релятивистской ядерной физики и потребность у исследователей в монохроматичных пучках все более тяжелых ядер с энергией от десятков МэВ до десятков и даже сотен ГэВ на нуклон, сделали первоочередной задачей создания ускорителей релятивистских ядер, позволяющих получать ускоренные пучки ядер всех элементов таблицы Менделеева вплоть до урана и обеспечивающих возможность проведения конкурентоспособных исследований на последующие годы. Увеличивающийся же дефицит электроэнергии и рост ее стоимости в условиях неизменности или даже снижения бюджетных ассигнований на оплату энергозатрат, сделали неотложной задачей замены синхрофазотрона - машины со слабой фокусировкой, обусловившей значительные габариты и вес ее магнитной системы (36 тыс. тс) с большим расходом электроэнергии на возбуждение магнитов и питание всех его систем - на современный ускоритель с жесткой фокусировкой, отвечающий поставленным требованиям при минимуме эксплуатационных затрат.

Современная тенденция развития ускорительной техники в мире для получения пучков высоких энергий лежит в создании ускорителей синхротронного типа с магнитными элементами со сверхпроводящими (СП) обмотками, позволяющими повысить плотность тока до величины порядка $2.5 \cdot 10^5$ А/см² (в поле 5 Тл) и тем самым резко сократить поперечные размеры магнитов с одновременным увеличением индукции в зазоре. Стоимость сооружения СП ускорителей в значительной мере определяется большой трудоемкостью применяемых магнитов на поля 4-10 Тл и большим расходом дорогого сверхпроводника, идущего на изготовление обмоток магнитных элементов. Замена подобных магнитов на сравнительно недорогие импульсные СП магниты с полем, формируемом железом, разработка и исследование которых ведется в ЛВЭ с середины семидесятых годов, - реальный путь уменьшения затрат на сооружение ускорителей.

Планируемое создание в ЛВЭ Нуклотрона - ускорителя релятивистских ядер - требовало приобретения опыта сооружения сверхпроводящих синхротронов с СП магнитными элементами, поле в зазорах которых формируется железом, и получения ответа на ряд вопросов, неизбежно возникающих при этом. Основной из них - возможность достаточно дешево, используя в основном ресурсы лаборатории и института, в сжатые сроки изготовить разрабатываемые узлы ускорителя, смонтировать их с необходимой точностью в единый ускорительный комплекс, на котором и получить ответ на вопросы об особенностях наладки и эксплуатации всех его систем. Необходимо было создать модельный синхротрон (он получил название СПИН), который бы и стал полигоном для практического решения возникающих проблем.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. На основе разработки оптимальных узлов единого ускорительного комплекса, создать конструкцию относительно дешевого модельного СП синхротронного ускорителя многозарядных ионов, состоящего из источника многозарядных ионов, форинжектора, канала инжекции и системы ввода пучка в синхротрон, кольцевой части и согласованных прямолинейных промежутков



ускорителя, разделенных на модули, с магнитной системой и вакуумной камерой, работающими в условиях погружения в жидкий гелий и отвечающими требованиям к ускорителю, на котором:

1. Реализовать концепцию замены линейного ускорителя на синхротрон, в вакуумной камере которого создается сверхвысокий вакуум, что обеспечивает возможность многократного ускорения циркулирующего заряженного пучка на одном - двух ускоряющих зазорах без потерь на остаточном газе;

2. Получить опыт изготовления, монтажа, наладки и эксплуатации СП ускорителя и всех его систем.

Для установки Нуклотрон - разработка вакуумной камеры, отвечающей требованиям к вакуумным камерам ускорителей, выдерживающей наружное избыточное давление не менее 1.3 кгс/см^2 , имеющей максимальное проходное сечение для ускоряемого пучка и минимум тепловых потерь от ее применения, монтируемой в готовые магнитные элементы без их разборки и обеспечивающей создание вакуума не менее 10^{-6} Па .

НАУЧНАЯ НОВИЗНА работы заключается в следующем.

1. На основе проведенных в Лаборатории высоких энергий исследований СП магнитных элементов с полем, формируемом железом и погружным способом охлаждения, разработана магнитная система модельного синхротрона с жесткой фокусировкой и разделенными параметрами, состоящая из дипольных и квадрупольных магнитов регулярной структуры и линз согласованных промежутков. Магнитная система включает оригинальные конструкции:

а) импульсных малогабаритных дипольных магнитов В1 со сверхпроводящими обмотками и полем высокой однородности, формируемом железом, с идентичностью повторяемости магнитных характеристик $\Delta H/H$ на уровне 10^{-4} .

б) импульсных фокусирующих и дефокусирующих линз типа Пановского со сверхпроводящими обмотками и полем высокой однородности, формируемым железом, с отношением сторон 1:2, обмотка в зазорах которых располагается в один слой вдоль широкой стороны и в два слоя - вдоль узкой и в которых достигнута рекордная величина градиента равная 0.88 Тл/см ;

в) импульсных фокусирующих и дефокусирующих линз типа Пановского со сверхпроводящими обмотками и полем высокой однородности, формируемым железом, с отношением сторон 1:1, предназначенных для использования в качестве элементов согласования пучка в прямолинейных промежутках ускорителя;

г) магнитных элементов канала инъекции, состоящих из "холодных" электростатического инфлектора и сепарирующего магнита на основе магнитов В1 и "теплого" поворотного магнита МП-90, обеспечивающего поворот пучка на 90° и его фокусировку в вертикальной плоскости;

д) элементов системы однооборотного вывода пучка, включающую импульсный (ударный) кикер - магнит в варианте с ферритовым сердечником и без него, подвижный септум - магнит и выводной СП магнит.

2. Разработана конструкция тонкостенной вакуумной камеры (ВК) установки СПИН, работающая в условиях погружения в жидкий гелий. Камера разделена на

участки, которые, за счет сильфонов, подвижно стыкуются друг с другом через болтовые фланцевые соединения типа "конфлаг" с прокладкой из меди. ВК установки изолирована от корпуса гелиевого сосуда проходными изоляторами на основе керамики типа ХС-22. Секции камер соединены между собой на сварке через кольцевые мембраны, компенсирующие термоусадки и обеспечивающие угловой поворот секций друг относительно друга. Выведены аналитические зависимости для определения величины возникающих напряжений в стенках секций камер и зависимости для определения критического давления потери их устойчивости, пригодные для инженерного расчета.

3. Разработана криостатная система ускорителя, выполненная в виде единого вакуумного объема и общего гелиевого сосуда с максимальным проходным сечением для газа, разделенная на модули, соответствующие блокам магнитной структуры, гибко соединяемые друг с другом через сильфоны и опирающиеся на опоры лабиринтного типа, передающие возникающие нагрузки на жесткие подставки. Азотный экран временно заменен на многослойную экранно-вакуумную изоляцию.

Предложена и реализована методика расчета теплопритока к гелиевому сосуду по опоре путем прогонки от уровня комнатной до гелиевой температур и учета изменения величины теплового потока, проходящего через кольцевые участки опоры.

Разработана конструкция разъемного по горизонтали гелиевого сосуда в варианте с тонкими отбортованными фланцами, крышка которого снимается путем вскрытия сварного шва, а также гелиевого сосуда с продольными толстыми фланцами, уплотняемые с помощью прокладок из индия.

Разработана конструкция участков заливных горловин, выполненных в виде модулей прямолинейных промежутков, оборудованных устройствами ввода криоагентов и коаксиальными тоководами с оригинальной системой отвода испаренного газообразного гелия по винтовым канавкам, обеспечивающая эффективный теплоотвод с токопроводящих частей токопровода.

4. Разработана конструкция тонкостенной вакуумной камеры установки Нуклотрон, выполненная из участков, соответствующих блокам магнитной структуры. овальные участки которой выполнены обжатием и гофрированием цилиндрических труб в прессформе, рабочее давление в которой создается путем заморозки воды в замкнутом объеме. В конструкцию ВК включены участки крионасосов. Корпуса блоков пикан-электродов и станций наблюдения, оборудованные радиаторами из труб с циркулирующим гелием, также работают как крионасосы. Участки камер соединяются друг с другом с помощью конических фланцев через медные прокладки. Стяжным элементом является оригинальный двухболтовой стяжной хомут, требующий минимума места для его установки. Прочностные характеристики овальных участков усилены за счет опирания на стенки магнитных элементов внутри зазоров. Выведены аналитические зависимости для определения величины возникающих напряжений, пригодные для инженерного расчета. Определены эксплуатационные характеристики вакуумной камеры Нуклотрона в зависимости от режима работы установки.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ. На основе разработанных узлов ускорителя создан сверхпроводящий модельный ускоритель многозарядных ионов,

который подтвердил правильность выбранного направления создания относительно недорогих ускорителей на основе импульсных СП магнитных элементов с полем, формируемом железом. Получены экспериментальные данные, подтвердившие правильность расчетно - конструкторских решений, принятых при создании узлов ускорительной установки. Получен опыт создания ускорителя опираясь, в основном, на ресурсы лаборатории и института, опыт наладки и эксплуатации всех его систем, позволивший положительно решить вопрос о создании базовой ускорительной установки ЛВЭ- Нуклотрона и давший исходный материал для разработки его вакуумной камеры и многих других узлов.

Создана вакуумная камера Нуклотрона, обеспечивающая возможность ускорения многоярдных ионов даже в условиях относительно небольшого разрежения в вакуумном кожухе машины и проведения физических экспериментов на внутреннем пучке, располагая регистрирующую аппаратуру вне криостата.

НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ:

1. Конструкция СП магнитных элементов (дипольных магнитов и линз) регулярной структуры и линз согласованных промежутков ускорителя с полем, формируемым железом, и с погружным способом охлаждения.

2. Конструкция "холодных" магнитных элементов канала инъекции пучка, включающая электростатический инфлектор, сепарирующий магнит и "теплый" 90° поворотной - фокусирующий магнит.

3. Конструкция магнитных элементов системы вывода пучка, включающая ударный (кикер) - магнит, подвижный септум - магнит и выводной магнит СКД-27.

4. Конструкция вакуумной камеры, разделенная на участки, гибко соединяемые друг с другом и соответствующие блокам магнитных элементов, пригодная для использования в ускорителе и работающая в условиях погружения в жидкий гелий.

5. Методика определения максимального избыточного давления для секций камер с мембранами на концах и эллиптических секций камер, опертых на стенки линз внутри зазора.

6. Конструкция криостатной системы, разделенная на модули, соответствующие блокам магнитных элементов, состоящая из вакуумного кожуха и гелиевого сосуда, включающая криостатную часть полуколец и согласованных промежутков.

7. Конструкция периода регулярной структуры.

8. Методика расчета теплопритока к гелиевому сосуду по опоре лабиринтного типа.

9. Конструкция восточного прямолинейного промежутка с участками заливных горловин, оборудованных устройствами ввода тока и хладоагентов.

10. Конструкция оптимизированного по току токоввода на 3 кА.

11. Конструкция западного прямолинейного промежутка, включающего конструкцию участка ввода - вывода, заливных горловин и т. д..

12. Конструкция криостатной части канала инъекции, включающую участок ввода и переходной участок, оборудованные продуваемыми токовводами на 300 А.

13. Конструкция вакуумной камеры Нуклотрона, разделенная на участки, соответствующие блокам магнитных элементов ускорителя, включающая тонкостенные

гофрированные овалыные секции, в участках линз соединенные с блоками пикап-электродов, мультипольных корректоров или станций наблюдения, а также участков крионасосов и ускоряющих станций.

14. Технология изготовления овалыных гофрированных секций камер для участков магнитов и линз методом прессования в формах, рабочее давление внутри которых создается за счет воды, замораживаемой в замкнутом объеме.

АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИИ.

Основные результаты работы докладывались на Международных конференциях по криогенике в Лондоне /Англия, 1978г./, Кобе /Япония, 1982г./ и Альбукерке /США, 1993/ на Международной конференции по магнитной технологии в Лондоне /1983г./, на Международной конференции по ускорителям высоких энергий в Батавии /США, 1983г./, на шестом и девятом Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц в Дубне /1978г. и 1984г./, на 4-ой Европейской Вакуумной Конференции и 1-ом Шведском Вакуумном Совещании в Упсале /Швеция, 1994г./ и на Международном совещании по Нуклотрону в Варне /Болгария, 1995г./.

Основное содержание диссертации опубликовано в 13 работах.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она изложена на 115 страницах основного текста, включающих 93 рисунка и 13 таблиц. Список использованной литературы включает 126 наименований на 5 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во ВВЕДЕНИИ обоснована актуальность темы и сформулирована цель работы. Кратко изложено основное содержание диссертации по главам, сформулированы основные требования к установке СПИН и вакуумной камере Нуклотрона. Дано обоснование выбора типа магнитных элементов для модельного синхротрона и приведены основные соображения, принятые при выборе числа регулярных периодов СПИНа.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ рассмотрены конструкции магнитной системы ускорителя исходя из концепции создания ускорительного комплекса без линейного ускорителя, который заменяется синхротроном, в вакуумной камере которого создается сверхвысокий вакуум и поэтому практически нет потерь ускоряемых ионов от перезарядки на остаточном газе. Приведена общая компоновка установки СПИН (см. рис. 1), состоящая из синхротрона с измерительным периодом, канала инъекции и инъекционного комплекса, расположенного на высоковольтной платформе и состоящего из высоковольтного трансформатора ИТ-800, ускоряющей трубки и источника ионов на входе в нее.

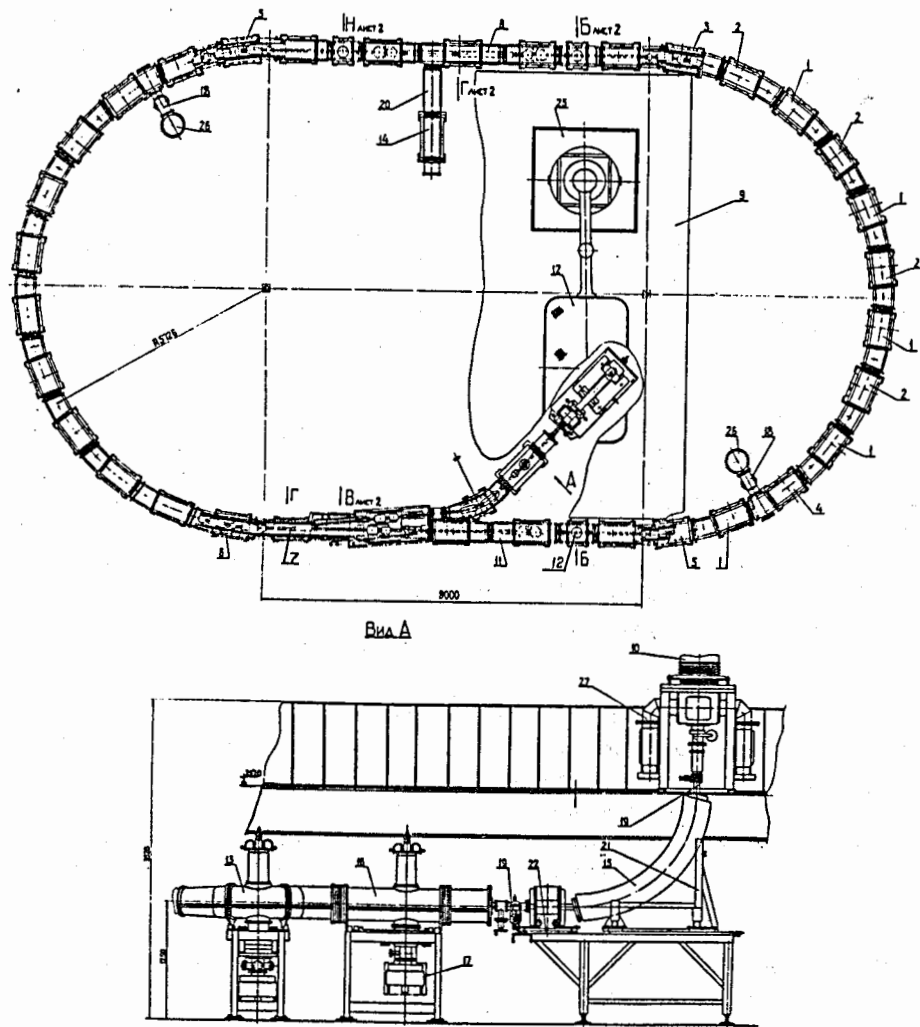


Рис.1. Общий вид установки СПИН.

1-2-периоды регулярной структуры с опорами высоковакуумной и изоляционной соответственно. 3, 6- период начальный; 4-период с откачкой изоляционного вакуума; 5-период концевой; 7-участок инфлектора; 8-восточный прямолинейный промежутки; 9-платформа; 10-форинжектор; 11-западный прямолинейный промежутки; 12-участок заливной горловины; 13-участок сепарирующего магнита; 14-участок измерительный; 15-магнит МП-90; 16-участок ввода; 17-печь насоса НМД-0.16; 18-переходник; 19-ионопровод канала инъекции; 20-переходной участок; 21-подставка магнита юстировочная; 22-линза МЛ-5; 24-вакуумная камера; 25-ионопровод канала вывода пучка; 26-насос ВА-5; 27-насос ВА-0.5; 29-ИТ-800.

Энергия частиц в установке определена из общих соображений. Интенсивность ускоренных частиц в машине определена из условий учета сил кулоновского расталкивания.

Реализация магнитной системы произведено блоками - периодами магнитных элементов, объединяемых общим жестким основанием (ложементом), на котором они устанавливаются с точностью не менее ± 0.01 мм от их номинального положения и на котором выполняется весь электрический монтаж. Приведены конструкции дипольного магнита В1 и линз Ф и Д (см. рис. 2-3), входящих в состав периода регулярной структуры и линз ФОИ, Ф1 и Д1, входящих в концевые периоды и дублеты линз согласованных промежутков.

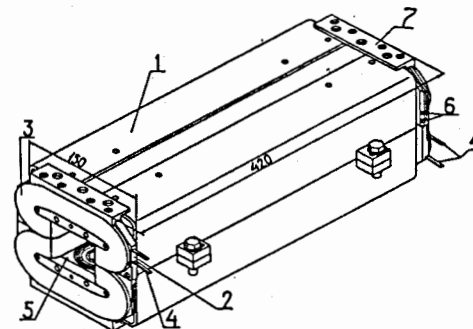


Рис. 2. Дипольный магнит В1

1-полумагнит; 2-накладка; 3-обмотка; 4-концы обмотки; 5-корректор; 6-клеммы корректора; 7-накладка прижимная.

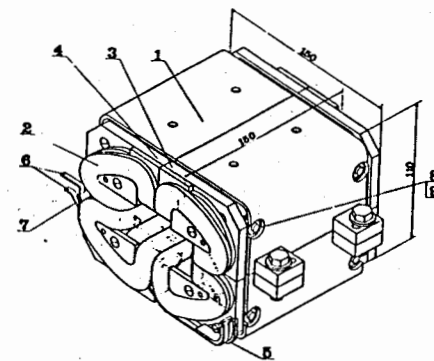


Рис. 3. Линза Ф

1-полулинза; 2-обмотка; 3-накладка; 4-концы обмотки; 5-спай; 6-концы обмотки; 7-фиксатор кабеля; 8-9- концы обмоток.

Расчетом компонент магнитного поля в апертуре магнитов определены допустимые погрешности на изготовление размеров кабеля, на положение его внутри зазора, допуски на зазор и длину магнитов, предопределивших технологию их сборки и обработки. Жесткость конструкции и идентичность магнитных характеристик задается магнитопроводами, собранными из пластин листовой электротехнической стали Э330А толщиной 0.5 мм, изолированными прокладками из стеклотекстолита и обработанными до номинальных размеров. Намотка кабеля производится непосредственно на магнитопроводы полумагнитов и "четвертушек" линз, на которых витки обмотки устанавливаются с точностью ± 0.01 мм и закрепляются в этом положении с помощью эпоксидного клея. Форма лобовых частей задается торцевыми накладками, выполняемыми методом фрезерования из стеклотекстолита и закрепляемых с помощью кондукторов на магнитопроводах с максимально возможной точностью. Магнит В1 оборудован двухслойной обмоткой активной коррекции C_1 , предназначенной для компенсации нелинейности магнитного поля на предельных

значениях напряженности поля и пассивной коррекции за счет установки прокладки толщиной 0.8 мм между витками №7 и №8 основной обмотки, чем достигается компенсация нелинейностей, вызванных применением корпусной изоляции.

Все разработанные и используемые в синхротроне линзы выполнены по типу линз Пановского, причем у линз Ф, ФОИ и Д отношение длин сторон 1:2, а у Ф1 и Д1 - 1:1.

Приведена конструкция магнитных элементов канала инжекции, параметры которых определены из условия согласования фазовых объемов инжектируемого и захватываемого в режим ускорения пучка и состоят из "холодных" и "теплых" устройств магнитной оптики. В криостатной части канала используются линзы (Ф, Д, Ф1 и Д1) и магниты (В1), работающие в режиме инжекции. "Посадка" пучка на орбиту производится импульсным электростатическим инфлектором, определение параметров которого произведено по законам классической механики, т. к. скорость частиц после форинжектора значительно меньше скорости света.

Перевод пучка после форинжектора из вертикального направления в горизонтальное производится "теплым" поворотом - фокусирующим магнитом МП-90, выполненным по типу "О" образных магнитов с минимальным расходом материала на его изготовление. Обмотка магнита выполнена из медной квадратной трубки, уложенной в зазоре в два слоя и охлаждаемой водой. Концы магнита скошены под углом 15°, чем достигается дополнительная фокусировка пучка в вертикальной плоскости.

Расчетом определены параметры системы однооборотного вывода пучка, на основании которых предложены конструкции магнитных элементов, пригодных для использования в ускорителе и включающие кикер-магнит, подвижный септум-магнит и выводной магнит.

Разработано два варианта конструкции полноапертурного кикер-магнита.

В первом варианте - без сердечника, с обмоткой в виде двух шин в форме пересекающихся окружностей с плакированными свинцом внутренними поверхностями, что уменьшает сопротивление протекающему по ним току питания за счет перехода свинца в сверхпроводящее состояние при охлаждении до температуры ниже 7.18 К. Расчетом определены возможные деформации магнита и его рабочие параметры.

Во втором варианте, как альтернатива предыдущему решению, разработана конструкция кикер - магнита с сердечником из феррита и обмотками из медных шин прямоугольной формы, обеспечивающая получение тех же самых полей, но требующая значительно меньшего напряжения для запитки обмотки возбуждения, чем в первом варианте. Сердечник такого магнита может быть изготовлен из феррита марок 150ВЧ или 200НН2 структуры шпинели, или же из феррита структуры граната, также подходящего для работы в условиях охлаждения до температур жидкого гелия.

Конструктивно оба варианта кикер-магнита оформлены как герметичный участок вакуумной камеры ускорителя и устанавливаются путем врезки в нее.

Разработана конструкция септум-магнита, выполненная в виде герметичного подвижного блока, состоящего из герметичного корпуса с камерой, двух одинаковых магнитов постоянного тока и общего для них септума, являющегося частью

герметичного блока. Поперечное сечение септума выбрано из условия минимума потерь для циркулирующего пучка. Магнитные элементы включены последовательно и составляют единый магнитный узел, размещаемый внутри вакуумной камеры. Охлаждение обмоток магнитов и их запитка производится через гибкие вводы, которые не мешают перемещению магнитного блока в рабочее положение и обеспечивают необходимое количество рабочих циклов в процессе эксплуатации. Крепление блока производится на подвижном кронштейне вакуумной камеры, перемещаемом с помощью привода, расположенного снаружи.

Разработана конструкция сверхпроводящего дипольного магнита СКД-27 для регулярной структуры СПС-2. Максимальное поле в зазоре магнита 2.2 Тл при токе

2.0 кА. Магнит СКД-27 использован в качестве выводного магнита для синхротрона первого этажа - СПС-1.

Предлагаемые конструкции кикер-магнитов, септум-магнита и выводного магнита могут быть использованы для оснащения СПС-1 однооборотным выводом пучка с эффективностью не менее 98%.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ рассматривается конструкция вакуумной камеры установки СПИН. Сформулированы технические требования к ВК как камере ускорителя, работающей в условиях погружения в жидкий гелий. Показано, что камера выполнена в виде отдельных, законченных монтажом узлов - участков, соответствующих модулям магнитной системы и изготавливается из стандартных труб с толщиной стенки 0.5 мм. Компенсация термоусадок и угловой поворот составляющих их секций производится за счет кольцевых мембран, устанавливаемых на концах каждой секции, а подвижность соседних участков друг относительно друга обеспечивается за счет сильфонных компенсаторов. Соединение участков камер между собой производится с помощью фланцевых соединений типа "конфлат" с прокладками из мягкой меди.

Конструктивные решения участков ВК выбраны с учетом конкретных условий и возможностей производства и его оснащения сварочным оборудованием.

Толщина стенок секций камер определена расчетом исходя из минимума тепловых потерь по гелию за счет разогрева вихревыми токами и из устойчивости от внешнего давления. Выведены аналитические соотношения для определения критического давления потери устойчивости цилиндрических секций камер с учетом растягивающего усилия от мембран. Путем решения дважды статически неопределимой задачи равновесия сечения камеры под воздействием внешних и внутренних сил и моментов, получены аналитические соотношения для определения максимальных напряжений в стенках эллиптических секций. Критическое давление потери устойчивости определено из условия работы пологих оболочек на прощелкивание.

Рассматривается конструкция ВК полукольца, собранная из регулярных повторяющихся участков (см. рис.4), которые состоят из секций, соответствующих элементам магнитной оптики, патрубков откачки или измерительных патрубков, присоединенных к переходной коробке через изолятор и других узлов, назначение которых определено их наименованием. В каждый участок включена секция с блоком пикап - электродов, входящих в систему определения центра тяжести циркулирующего пучка.

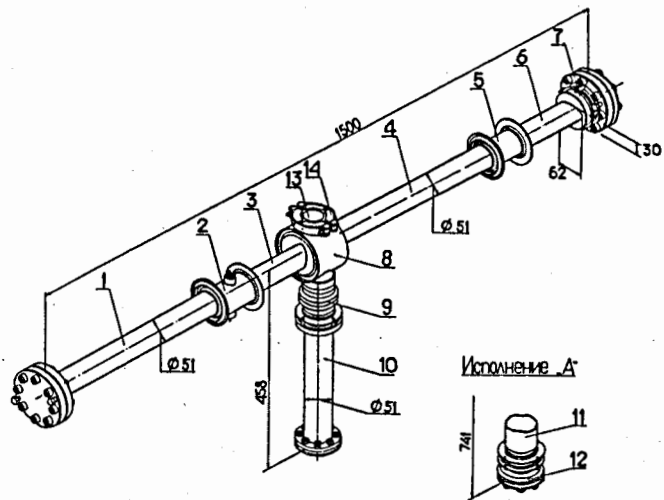


Рис. 4. Вакуумная камера периода регулярной структуры.

1, 4- секции магнита; 2- секция пикап-электродов; 5- секция корректора; 6- секция линзы Ф; 7- секция сифонного омпенсатора; 8- коробка переходная; 9- изолятор; 10- патрубок измерительный; 11- патрубок откачной; 12- переходник; 13- заглушка; 14- хомут фиксирующий.

Рассматривается конструкция ВК восточного прямолинейного промежутка (ВПП) (см. рис. 5), разделенная на участки, подвижно соединяемые друг с другом за счет сифонов и уплотняемые с помощью болтовых фланцевых соединений типа "конфлат" с прокладкой из меди. Конструктивно все участки ВК ВПП выполнены из труб, толщина которых выбрана из условия работы на устойчивость от внешнего давления.

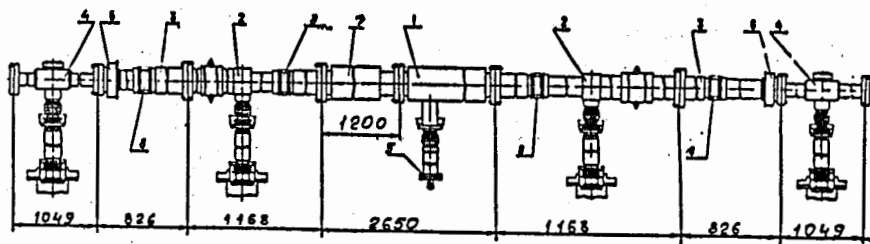


Рис. 5. Вакуумная камера восточного прямолинейного промежутка.

1- участок ускоряющего электрода 1; 2- участок линз; 3- переходной участок; 4- концевой участок; 5- магнитоиндукционный преобразователь; 6- ввод ВЧ-питания; 7- участок ускоряющего электрода 2; 8- сиффон.

Приведена конструкция участка ускоряющего электрода, в котором диаметр трубы для кожуха выбран максимально возможным, чтобы емкость ускоряющего электрода, опирающегося на керамические изоляторы, была минимальной. Приведена конструкция участка линз, секции линз которого, проходящие внутри зазора,

выполнены минимальной толщины, определенной из условия устойчивости от внешнего давления. Участок оборудован двумя парами пикап - электродов, позволяющими определять смещение центра тяжести пучка по горизонтали и вертикали.

Рассмотрена конструкция ВК западного прямолинейного промежутка (ЗПП) (см. рис. 6), состоящая из участков, выполненных из цилиндрических секций. Подвижность участков друг относительно друга осуществляется за счет сифонов, соединения - через медные уплотнительные прокладки.

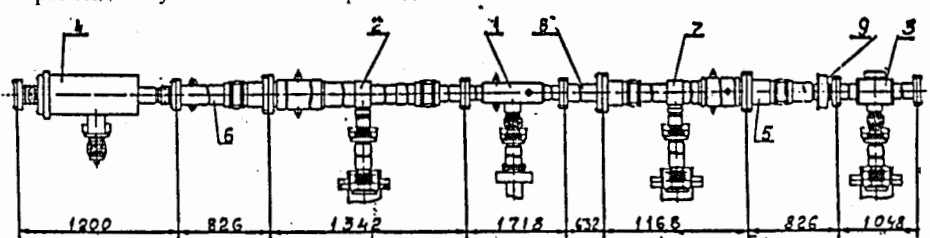


Рис. 6. Вакуумная камера ЗПП.

1-центральный участок; 2-участок линз; 3-концевой участок; 4-участок инфлектора; 5-6-свободный участок, 7-участок линз; 8-переходник; 9-магнитоиндукционный преобразователь.

Приведена конструкция центрального участка, оборудованного двумя парами пикап - электродов и патрубком откачки.

Приведена конструкция участка инфлектора, цилиндрическая часть которого выбрана из соображений размещения в нем инфлектора, а толщина стенок - устойчивости от внешнего давления. Участок электрически оторван от ВК канала инжекции (КИ) и от камеры ЗПП за счет проходных изоляторов и заземлен через опорный патрубок. Ввод питания инфлектора производится через проходной изолятор.

Рассмотрена конструкция ионопровода канала инжекции (ИКИ), состоящая из "холодной" и "теплой" частей. К "холодной" части относятся участки, соответствующие блокам магнитных элементов, участок изолированного ввода и переходной участок.

Приведена конструкция участка сепарирующего магнита, поворот на угол 41° в котором производится с помощью переходных коробок с мембранами. Участок оборудован откачным патрубком.

Приведена конструкция участка ввода, секции которого конструктивно аналогичны секциям ВК ПРС.

Приведены конструкции участков изолированного ввода и переходного, выполненных на основе проходных изоляторов и сифонов, обеспечивающими тепловую развязку ионопровода при вводе от уровня комнатных температур до 4.6 К.

Приведена конструкция задвижки быстродействующей, разработанная как узел уменьшения газового потока от "теплой" части ионопровода к "холодной" и как индикатор прохода пучка. Подвижные части задвижки, обеспечивающие перекрытие проходного сечения, выполнены с минимумом веса и максимально уравновешенными

относительно оси вращения, чем достигается минимальное время срабатывания. Ввод движения производится через сильфонный вакуумный ввод движения.

Расчетом определены параметры системы откачки ВК с учетом технологии высоковакуумной подготовки элементов конструкции, которые прошли высокотемпературное обезгаживание в стенде и хранились, заполненные сухим азотом.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА посвящена рассмотрению конструкции криостатной системы установки СПИН. Определены основные требования к системе, исходя из принятой концепции разделения магнитной системы на модули и предназначенной для обеспечения охлаждения магнитных элементов путем заполнения гелиевой ванны жидким гелием.

Криостатная система (см. рис. 1) выполнена из модулей полуколец и криостатов ВПП и ЗПП, собранных из участков - периодов, в которых вакуумные кожуха и гелиевые сосуды гибко соединены друг с другом через компенсаторы.

Рассмотрена конструкция периода регулярной структуры (ПРС) (см. рис. 7), выполненного в виде модуля ускорителя и состоящего из вакуумного кожуха, гелиевого сосуда, азотного экрана и модуля магнитных элементов, включая вакуумную камеру, расположенных на ложементе. Гелиевый сосуд с ложементом, через опору лабиринтного типа, опирается на подставку, на которую опирается и вакуумный кожух.

Приведена конструкция вакуумного кожуха, выполненная в виде разборного по горизонтали тонкостенного сосуда с продольными и поперечными фланцами. Уплотняется сосуд с помощью резиновых прокладок с образованием "Т" образного стыка в месте пересечения продольного и поперечного фланцев.

Приведена конструкция гелиевого сосуда ПРС, выполненная из листовой нержавеющей стали толщиной 2 мм цилиндрической формы с отбортовками, служащими для обеспечения возможности многократного вскрытия сварного шва по ним, чтобы произвести съем крышек и иметь доступ к оборудованию внутри сосуда. В конструкцию входит компенсатор, выполненный на основе сильфона 320×13×0.5 мм.

Расчетом определена величина деформации сосуда в районе опорного фланца, которая является частью общего перемещения, определены усилия и моменты, передаваемые на опору.

Приведена конструкция опоры лабиринтного типа, состоящая из трех коаксиально расположенных опорных стаканов. Внутренний стакан, для варианта работы без азотного экрана, выполнен из стеклотекстолита, что уменьшает теплопередачу по опоре к гелиевому сосуду. Подключение насосов откачки ВК и вакуумного кожуха производится через переходник опоры, который оборудован патрубками для присоединения фланцев измерительной аппаратуры. Расчет определена величина деформации опоры, складывающаяся из деформации составляющих ее стаканов. Определено, что деформация такой опоры меньше, чем деформация стержня с длиной, эквивалентной длине ее трех стаканов. Усилия с опоры передаются на подставку периода.

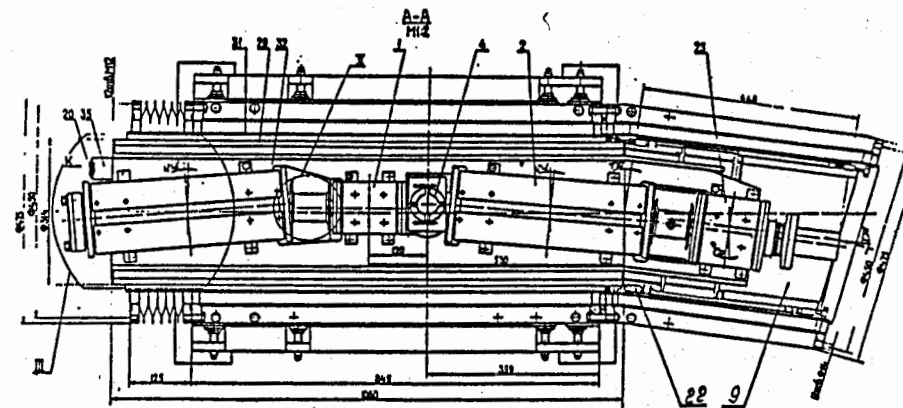
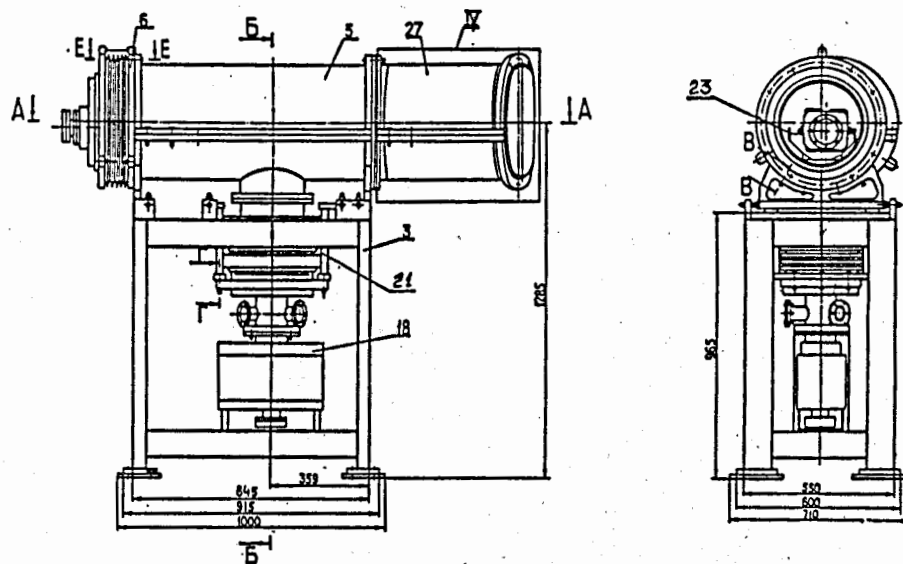


Рис. 7. Период регулярной структуры.

1-линза; 2-магнит В1; 3-подставка периода; 4-хомут фиксирующий; 5-вакуумный кожух; 6-компенсатор; 7-опора; 8-прокладка; 9, 27-переходник; 10-12-болт; 14-гайка; 16-17-шайба; 18-насос НМД-0.16; 19-кольцо; 20-разъем; 21-подвеска; 22-компенсатор сильфонный; 23-шинопровод; 24-домкрат; 25-линза; 29-основание; 30-крышка; 32-ложемент; 33-вакуумная камера; 34-фланец опоры; 35-кронштейн; 36-суперизоляция.

Приведена конструкция подставки периода, выполненная из элементов коробчатого сечения с использованием стандартного проката. Определена величина перемещения

подставки под воздействием приложенных сил, для чего решена задача расчета 48 раз статически неопределимой фермы, являющейся эквивалентной схемой для подставки периода. Определено, что подставка имеет необходимый для опоры модуля ускорителя запас прочности и жесткости.

Рассмотрена конструкция криостата ВПП (см. рис. 8), состоящего из участков, в конструкции которых широко используются элементы криостата ПРС. Все участки подвижно соединены друг с другом за счет использования сильфонных компенсаторов для вакуумных кожухов и гелиевых сосудов.

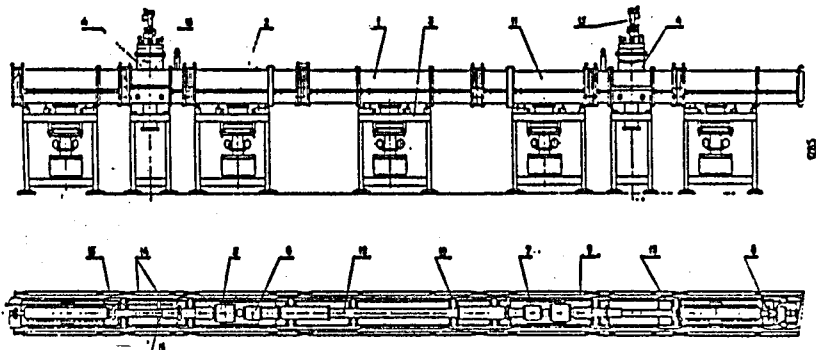


Рис. 8. Восточной прямолинейный промежуток.

1-вакуумный кожух ПРС; 2-опора высоковакуумная; 3-подставка ПРС; 4- участок заливной горловины; 5-линза Д1; 6-линза Ф1; 7-ложемент дублета линз; 8-вакуумная камера; 9-гелиевый сосуд участка линз; 10-компенсатор сильфонный; 11-вакуумный кожух; 12-электрод ускоряющий; 13-МИП; 14-труба разводки гелия; 15-токовводы; 16-перегородка.

Приведена конструкция заливной горловины, через которую производится снабжение криостата криоагентами, вводится ток питания магнитных элементов, выводятся провода измерительной аппаратуры и измеряется уровень гелия в сосуде. Патрубок выброса газа горловины служит для установки приборов защиты от избыточного давления внутри гелиевого сосуда. Конструктивно горловина выполнена как участок криостатной системы. Гелиевый сосуд опирается на вакуумный кожух, закрепленный на подставке. Азотный экран горловины выполнен в виде наливного азотного сосуда. Вакуумный кожух разъемный по горизонтали и верхняя часть его может быть снята без разборки конструкции горловины, которая опирается на кольцо внутри кожуха, закрепленные на нижней его половине.

Горловина оборудована двумя парами коаксиальных токовводов, конструкция которых приводится. Токовводы представляют собой коаксиально расположенные медные трубы, изолированные кольцевыми изоляторами друг от друга и проходными изоляторами - от корпуса гелиевого сосуда и вакуумного кожуха. Отвод охлаждающего газа производится по винтовым канавкам на поверхности медных труб, способствующих турбулизации потока и поджатию его к стенкам канавок, улучшающим тем самым условия теплоотвода от токопроводов. Внутренняя часть токоввода оборудована под проход переливного сифона заправки гелием.

Рассмотрена конструкция криостата ЗПП (см. рис. 9), разделенная на участки, в конструкциях которых использованы элементы ПРС.

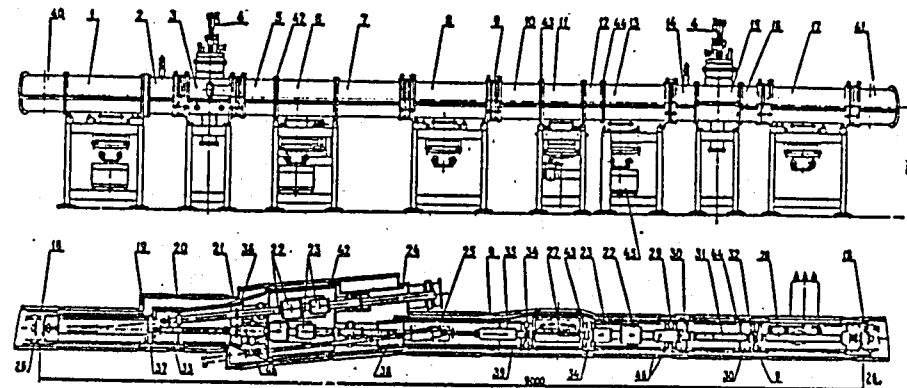


Рис. 9. Западный прямолинейный промежуток.

1-участок инфлектора; 2, 14-переходник с азотным вводом; 3-участок заливной горловины ЗПП; 4-токоввод; 5, 7, 10, 12, 16-переходник вакуумный; 6-участок ввода-вывода; 8-участок выводного магнита; 9, 20, 21-компенсатор; 11-участок септум-магнита; 13-участок линз согласованного промежутка; 15-участок заливной горловины ВПП; 17-участок концевой; 18-линза ФОИ; 19-переходник вакуумного кожуха; 22-23-линзы Д1 и Ф1; 24, 42-44-кольцо-проставка; 25-магнит выводной (СКД-27); 26-переходник гелиевый компенсирующий; 27-септум-магнит; 28, 31-камера вакуумная; 29, 34-сильфонный компенсатор; 30, 33, 35-39-вставка гелиевая; 32-магнитоиндукционный преобразователь; 39-экран азотный; 40, 41-переходник вакуумный, поворотный; 45-насос НМД-0.16; 46-блок пикап-электродов.

Приведена конструкция участка ввода - вывода, являющегося местом геометрического пересечения траекторий вводимого, выводимого и циркулирующего пучков, что и определило его конфигурацию. Вакуумный кожух и гелиевый сосуд выполнены тонкостенными. Вакуумный кожух усилен ребрами, а гелиевый сосуд стенкой, расположенной внутри сосуда и работающей на растяжение и на устойчивость. Участок опирается на две опоры, расположенные под блоками дублетов линз.

Рассмотрена конструкция криостата канала инъекции (см. рис. 10), состоящая из криостатов участка ввода и участка сепарирующего магнита, соединенных с гелиевым сосудом и вакуумным кожухом ЗПП.

Приведена конструкция криостата сепарирующего магнита, выполненного на основании принципов, заложенных при проектировании криостатной системы ускорителя и дополнительно оборудованного фланцем с блоком из 4-х пар продуваемых газом коаксиальных токовводов по 300 А каждый. Токопроводы - медные трубы с винтовыми канавками на поверхности. Охлаждающий газ собирается в коллекторе и отводится через специальный патрубок. На крышке блока токовводов

установлен блок герметизированных разъемов, продуваемых газом и предназначенных для вывода из криостата проводов измерительной и контрольной аппаратуры.

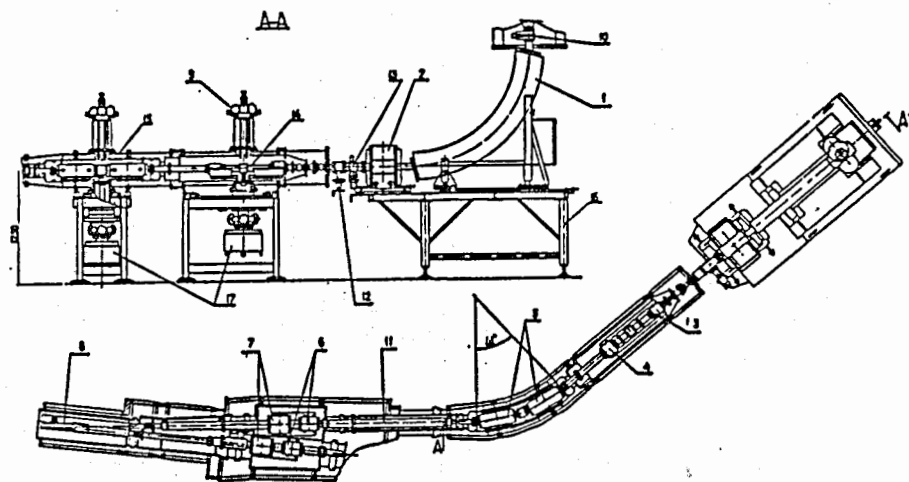


Рис. 10. Канал инжекции.

1-магнит МП-90; 2-линза МЛ-5; 3-линза Д; 4-линза Ф; 5-магнит сепарирующий; 6-линза Ф1; 7-линза Д1; 8-инфлектор; 9-блок токовводов; 10-вакуумный затвор; 11-вакуумная камера; 12-вакуумный затвор; 13-задвижка быстродействующая; 14-участок ввода; 15-участок сепарирующего магнита; 16-подставка; 17-насос НМД-0.16 (НОРД-100).

Приведена конструкция участка ввода, собранного из элементов конструкций трех прототипных периодов (ТПП), испытание которых предшествовало созданию криостатной системы установки СПИН. Участок оборудован блоком токовводов, аналогичным блоку сепарирующего магнита, и торцом, через который вводится ИКИ в изоляционный вакуум и в гелиевый сосуд.

Рассмотрена конструкция криостата измерительного периода, выполненная из элементов ТПП и оснащена антикриостатом, обеспечивающим возможность измерения поля в магнитных элементах снаружи, без нарушения вакуума.

Связь измерительного периода с ВПП производится с помощью приведенной конструкции участка переходного, выполненного также с использованием элементов ТПП. Связь по гелию в нем осуществляется трубой $\varnothing 65 \times 2$ мм, через которую проходят провода и кабели электрических коммуникаций из периода к заливной горловине.

Расчетом определены теплопритоки к гелиевому сосуду по всем элементам конструкции за счет теплопередачи и через излучение. Определение теплопритока по опоре лабиринтного типа производится из предположения об одномерности процесса теплопередачи и производится путем учета изменения теплового потока при переходе от одного кольцевого сечения к соседнему прогонкой от уровня температур 300 К до

4.6 К. Определен общий теплоприток к гелиевому сосуду, который оказался примерно на 20% больше реально полученного при испытании.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА посвящена рассмотрению конструктивных решений по вакуумной камере установки Нуклотрон. Приведены основные параметры машины и дано обоснование необходимости создания ВК и основные технические требования к ней. Дополнительное требование - необходимость монтажа секций камеры в магнитные элементы без разборки последних, а соединение между секциями должно производиться с использованием минимума пространства для соединительных элементов. Определены особенности конструкции ВК (см. рис. 11), состоящей из секций, соответствующих

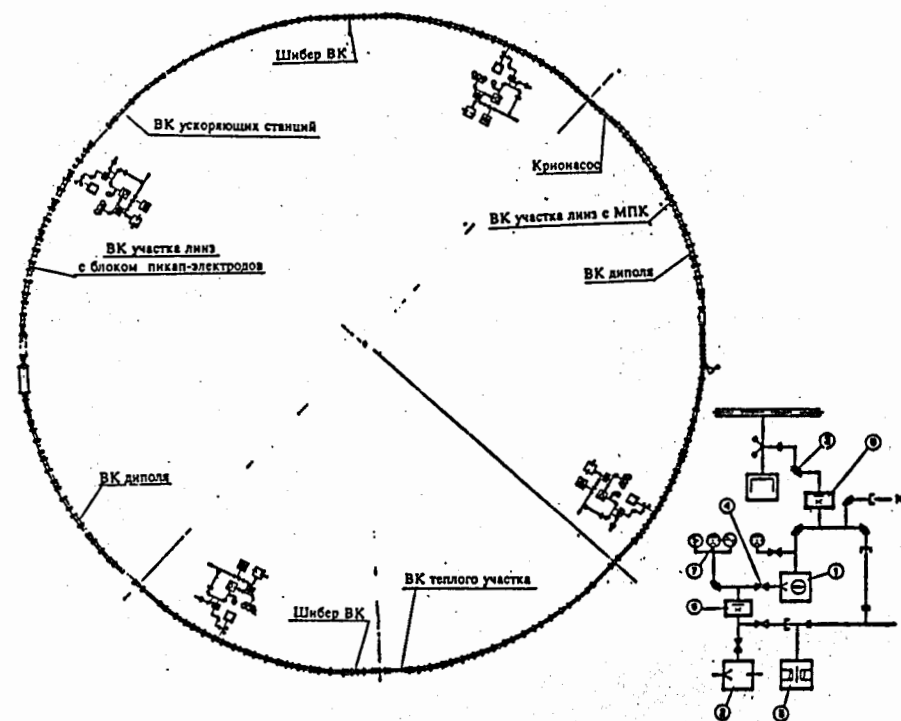


Рис. 11. Вакуумная камера установки Нуклотрон.

1-Турбомолекулярный насос; 2-Насос форвакуумный; 3-Вентиль вакуумный угловой; 4-Вентиль вакуумный; 5-Масс-спектрометр гелиевый; 6-Азотная ловушка; 7-Блок датчиков давления.

модулям магнитных элементов, ВК ускоряющих станций, крионасосов и "теплого" промежутка, расположенного вне криостата. Камера электрически и по вакууму разделена на 2 полукольца за счет использования проходных изоляторов на основе керамики типа ХС-22 с металлическими юбками и за счет "холодных" шибберов. В конструкцию камеры включены элементы системы диагностики пучка, состоящие из станций наблюдения за пучком, магнитоиндукционных датчиков, подвижного секционированного цилиндра Фарадея, проволочных профилометров с дистанционным управлением, профилометров на основе ВЭУ и ПЗУ - камер, системы блоков пикап - электродов и измерительный электрод на основе ВК для ускорительной станции.

Приведены конструкции блока пикап - электродов, станции наблюдения за пучком, модуля линзы с блоком корректирующего магнита, участка камеры с изолятором и магнитоиндукционным датчиком. Приведена конструкция шиббера высоковакуумного, используемого для разделения камеры по вакууму. Соединение секций камер между собой производится двухболтовым хомутом.

Определена форма секций камеры, расположенных внутри зазоров магнитных элементов, с учетом минимума теплопритока за счет разогрева вихревыми токами и устойчивости от внешнего давления. Камера расперта внутри магнитных элементов, что увеличивает устойчивость стенок камеры и позволяет уменьшить ее толщину. Расчетом, из условия равновесия сечения камеры под воздействием внешних и внутренних сил и моментов, определены максимальные напряжения, возникающие в стенках камер. Решение дважды статически неопределимой задачи произведено энергетическим методом. Толщина стенки камеры выбрана из условия, что она может занимать не более 2.5 мм на сторону, определенных как разница между апертурой магнитного элемента и максимальным сечением пучка (с учетом допусков) в этом месте. Жесткость тонкой стенки камеры увеличена гофрированием труб - заготовок (см. рис. 12) в специально разработанных прессформах, рабочее давление для деформирования заготовки в которых создается за счет заморозки воды в замкнутом объеме.

Расчетом определены параметры системы откачки ВК. Откачка производится на "тепле" турбомолекулярными и магниторазрядными насосами, присоединяемыми к откачным патрубкам блоков пикап - электродов, и с помощью крионасосов - на "холоде". Приведена конструкция крионасоса, выполненного как модуль ускорителя на основе трубы $\varnothing 159 \times 4$ мм, на которую навита медная труба

$\varnothing 6 \times 0.5$ мм, по которой в рабочем режиме циркулирует жидкий гелий.



Рис. 12. Заготовки гофрированных труб для линз и магнита.

Показано, что натурные испытания ВК дали результаты откачки, превосходящие полученные расчетом, т. к. поток десорбции с поверхности стенок камеры оказался меньше, чем заложен в расчете. Уменьшение потока десорбции достигнуто за счет принятой технологии подготовки элементов камеры, включающие ультразвуковую промывку, 24-х часовое обезгаживание в вакуумной печи при температуре 750°C и соблюдение требований вакуумной гигиены в процессе хранения и монтажа секций камеры в блоки магнитных элементов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

1. Разработана и реализована общая компоновка сверхпроводящего модельного синхротрона СПИН, выполненного в виде двух суперпериодов, состоящих из полуколец с регулярно повторяющимися модулями и примыкающими к ним прямолинейными согласованными промежутками, канала инжекции и форинжектора на основе ускорительной трубки ЛУ-9, запитываемого от импульсного трансформатора ИТ-800.

2. Разработана и реализована конструкция импульсных дипольных магнитов синхротрона типа "О" со сверхпроводящей обмоткой и полем высокой однородности, формируемым железом, отличающихся идентичностью магнитных характеристик $\Delta H/H$ на уровне 10^{-4} и создающих поля до 2.3 Тл.

3. Разработана и реализована конструкция линз синхротрона типа Пановского со сверхпроводящей обмоткой и железным сердечником, обеспечивающих минимум веса при максимальном использовании апертуры пучка, отличающихся идентичностью магнитных характеристик на уровне 10^{-3} и обеспечивающих градиент в 0.88 Тл/см.

4. Разработана и реализована конструкция сварной вакуумной камеры установки СПИН, разделенная на участки, состоящие из секций с кольцевыми гофрированными мембранами на концах, предназначенных для компенсации угловых и температурных перемещений. Секции выполнены из осботонкостенных труб нержавеющей стали. Соединение участков ВК друг с другом производится с помощью разъемных фланцевых соединений типа "конфлат" с медной прокладкой. Гибкость соединений друг с другом обеспечивается сифонами. Сечение ВК выбрано минимальным из соображений прохода пучка без "зарезания".

ВК обеспечивает получение вакуума 10^{-6} Па при комнатной температуре и не менее 10^{-11} Па при охлаждении до температуры жидкого гелия.

5. Выведены аналитические соотношения для определения устойчивости элементов вакуумной камеры с мембранами на концах и определены напряжения для эллиптических участков камеры, опертых на элементы конструкции внутри зазора линз.

6. Разработаны и реализованы конструкции магнитных элементов однооборотной инжекции, включающие электростатический инфлектор, сепарирующий магнит и теплый 90 -то градусный поворотный - фокусирующий магнит, обеспечивающие транспортировку пучка заряженных частиц от форинжектора до входа в синхротрон и его согласование с элементами регулярной структуры.

7. Разработаны и реализованы конструкции ионопровода канала инъекции, разделенного на модули, состоящие из теплой и холодной частей, разделяемые по вакууму быстродействующей задвижкой и обеспечивающие изолированный проход от теплой части к холодной, находящейся в жидком гелие.

8. Разработаны конструкции магнитных элементов канала однооборотного вывода пучка, включающие ударный магнит в варианте без сердечника и с ферритовым сердечником, подвижный септум-магнит типа Ламбертсона со сверхпроводящей обмоткой и выводной магнит типа "О" со сверхпроводящей обмоткой, которая на лобовых частях располагается в форме "седла".

9. Разработана и реализована конструкция криостатной системы, разделенная на модули, гибко соединяемые друг с другом и опирающиеся на подставки, обеспечивающие независимую юстировку гелиевых сосудов и вакуумных кожухов.

10. Разработана и реализована конструкция теплового моста - опоры лабиринтного типа, обеспечивающая как крепление гелиевого сосуда и модуля магнитных элементов, так и их юстировку на тепле и на холоде относительно соседних модулей.

11. Разработана и реализована конструкция разъемного по горизонтали и по стыкам модуля гелиевого сосуда криостата установки, обеспечивающая максимальное проходное сечение по периметру орбиты и предусматривающая размещение в ней синхротрона 2-го этажа.

12. Разработана и реализована конструкция технологичных коаксиальных тоководов, выполненных из медных труб с винтовыми канавками на их поверхности, служащими для прохода охлаждающего газа, обеспечивающих пропускание тока 3 кА по каждому тоководу и использование центрального отверстия для прохода наконечника переливного сифона или прохода кабелей для измерительной аппаратуры.

13. Разработана и реализована конструкция участка ввода - вывода, обеспечивающая размещение в нем и юстировку дублетов линз западного прямолинейного промежутка и канала инъекции, обеспечивающая проход через него ионопровода канала выведенного пучка.

14. Разработана и реализована конструкция модулей криостата канала инъекции, состоящих из участков сепарирующего магнита и участка ввода, оборудованных блоками из 4-х пар продуваемых газом тоководов на 300 А каждый.

15. Разработана и реализована конструкция измерительного периода, примыкающего к восточному прямолинейному промежутку, объединенного с ним по вакууму и гелию и оборудованного антикриостатом, позволяющим производить измерение полей магнита и линзы снаружи, без нарушения вакуума в установке.

16. Разработана и реализована вакуумная камера для установки Нуклотрон, разделенная на секции, соответствующие модулям ускорителя и монтируемая внутри зазоров магнитных элементов без разборки последних.

17. Разработана и реализована конструкция стяжных хомутов для соединений типа "конфлат" с медными прокладками, обеспечивающая соединение соседних секций камеры при минимуме занимаемого пространства между магнитными элементами.

18. Разработана и реализована технология изготовления овальных гофрированных труб для магнитов и линз методом прессования в специальных формообразующих

прессформах. В качестве среды, создающей давление внутри деформируемой трубы-заготовки, используется вода, замораживаемая в замкнутом объеме.

19. Дан расчет труб овальной формы, опирающихся на элементы конструкции магнитов и линз внутри их зазоров.

20. Разработана и реализована схема откачки ВК, обеспечивающая откачку камеры без попадания паров масла внутрь объема и состоящая из внешних средств откачки и встроенных крионасосов, выполненных в виде секций-модулей ускорителя, размещаемых в свободных промежутках и в виде охлаждаемых блоков станций пикап-электродов. К этим блокам присоединяются и патрубки откачки камеры внешними насосами.

21. Определены характеристические параметры для откачки всех элементов ВК установок СПИН и Нуклотрон и расчетом определено предельное давление, которое можно получить внутри камеры на тепле и на холоде.

Экспериментальная проверка основных узлов установки СПИН на стенде при испытании трех периодов регулярной структуры и в процессе холодного запуска установки подтвердили их работоспособность и надежность.

Было показано, что при устранении течей, выявленных в процессе подготовки установки к заливке гелия, в ВК на тепле уверенно достигается вакуум $2.6 \cdot 10^{-7}$ Па и изолирующий вакуум в вакуумном кожухе не менее $1.3 \cdot 10^{-3}$ Па.

Осуществляется проводка пучка заряженных частиц от форинжектора к синхротрону, а циркуляция пучка на тепле на поле инъекции при этом составляет более 120 мс.

При "холодном" запуске установки теплоприток к гелиевому сосуду составил 800 Вт, что несколько выше расчетного и объясняется недостаточно полной изоляцией гелиевого сосуда от теплопередачи излучением.

В процессе эксплуатации вакуумной камеры установки Нуклотрон как на тепле, так и на холоде были подтверждены ее высокие эксплуатационные качества и надежность.

Было определено, что поток десорбции с ее поверхности значительно меньше предполагаемого, что позволяет достаточно быстро и с меньшим количеством задействованных насосов достичь проектных параметров откачки. Измеренное давление в ВК по датчикам, расположенными на выходе из патрубков откачки, составляет (10^{-9} - 10^{-10}) Па на "холодной" части и (10^{-6} - 10^{-7}) Па - на "теплой". Показания датчиков давления, расположенных непосредственно на камере, были на два порядка ниже.

Наличие в конструкции камеры свободного от криостата теплового промежутка позволяет проводить физические эксперименты с использованием тонкой внутренней мишени уже на этапе наладки ускорителя, размещая детектирующую аппаратуру вне криостата.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. С.А. Аверичев, А.М. Балдин, ..., Е.А. Матюшевский, ..., И.А. Шелаев.

Некоторые характеристики свехпроводящих магнитов типа "оконная рама" для создания полей до 2.5 Тл. Препринт ОИЯИ, Р8-11700, Дубна, 1978.

2. V.G. Aksenov, S.A. Averichev, A.M. Baldin, ..., E.A. Matyushevsky, ..., I.A. Shelaev. Proc. of the Seventh Intern. Cryogenics Engineering Conference, London 4-7 July, 1978, ICES7, p.171-176.

3. В.С. Алфеев, ..., Е.А. Матюшевский, И.А. Шелаев. Моделирование "холодной" вакуумной камеры сверхпроводящего синхротрона. Препринт ОИЯИ, P9-81-339, Дубна, 1981.

4. И.А. Шелаев, С.А. Аверичев, ..., В.С. Алфеев, А.М. Балдин, ..., Е.А. Матюшевский и др. Три прототипных периода СП магнитной оптики. Препринт ОИЯИ, P9-83-383, Дубна, 1983.

5. И.А. Шелаев, С.А. Аверичев, ..., В.С. Алфеев, А.М. Балдин, ..., Е.А. Матюшевский и др. Проектные параметры модельного сверхпроводящего синхротрона ОИЯИ. Препринт ОИЯИ, P9-83-582.

6. Design Features of a Model Superconducting Synchrotron of JINR. Proc. of 12-th Intern. Conf. of High Energy Accelerators, Batavia, 11-16 August 1983, p. 416.

7. Е.А. Матюшевский, И.А. Шелаев, И.П. Юдин. Инжекционный канал установки СПИН. /Выбор конструкции и параметры/. Препринт ОИЯИ, P9-83-817.

8. Е.А. Матюшевский и др. Коаксиальный токовод для питания сверхпроводящих магнитных элементов. Сообщение ОИЯИ, 9-84-179

9. Е.А. Матюшевский и др. Гелиевый сосуд периода модельного синхротрона. Сообщение ОИЯИ, 9-84-184.

10. В.С. Алфеев, ..., Е.А. Матюшевский и др. в кн. Труды 9-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984, т.1, стр. 441.

11. Н.Н. Агапов, В.С. Алфеев, ..., Е.А. Матюшевский и др. Препринт ОИЯИ, P9-85-593, Дубна, 1985.

12. A.M. Baldin, ..., A.D. Kovalenko, ..., E.A. Matyushevsky, et al. "Cryogenic system of the Nuclotron - a new superconducting synchrotron". /Submitted to the Cryogenic Engineering Conference 12-16 July, Albuquerque, USA/. Препринт ОИЯИ, E9-93-273.

13. E.A. Matyushevsky et al. "Ultra-High vacuum system of "NUCLOTRON". Proc. of 4-th European Vacuum Conference and 1-st Swedish Meeting. Upsala, Sweden, June 13-17, 1994.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 сентября 1996 года.