

10;12

Создание компактных циклотронов СС-18/9, СС-12 и МСС-30/15 для производства медицинских радиоизотопов

© П.В. Богданов, М.Ф. Ворогушин, Е.А. Ламзин, В.П. Кухтин, С.Е. Силаев, Ю.И. Стогов, А.П. Строкач, С.Е. Сычевский, Н.Ф. Шилкин

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова,
196641 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: sytch@sintez.niefa.spb.su

(Поступило в Редакцию 13 августа 2010 г.)

Представлена концепция создания компактных циклотронов, выделены конструктивные особенности таких циклотронов, приведены основные технические характеристики ускорителей, описаны результаты численного моделирования основных систем (магнитной и ускоряющей) и исследования этих изготовленных систем.

Введение

Одной из важнейших составляющих современного здравоохранения является ядерная медицина. Диагностика широкого спектра заболеваний и терапия злокачественных опухолей базируются на использовании радиоизотопов (радионуклидов) искусственного происхождения и являются одним из наиболее востребованных ее направлений.

Радионуклидная продукция медицинского назначения условно может быть разделена на три группы: ультракороткоживущие, короткоживущие и долгоживущие радиоизотопы.

К ультракороткоживущим радиоизотомам, используемым для изготовления радиофармпрепаратов, необходимых в позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), относятся изотопы углерода (C-11), азота (N-13), кислорода (O-15) и фтора (F-18).

ПЭТ-диагностика дает возможность проводить обследование пациентов как в статическом, так и в динамическом режимах, при этом пациент получает значительно меньшую долю облучения, чем в процессе рентгеновского сеанса. Однако короткое время жизни радионуклидов (период полураспада от 2 до 109 min) требует создания специализированных ПЭТ-центров, в состав которых входят циклотрон для получения пучков ускоренных протонов или дейтронов, мишенный комплекс для наработки и выделения радионуклидов, радиохимическая лаборатория для синтеза радиофармпрепаратов, один или несколько ПЭТ-сканеров для обследования пациентов.

Для наработки позитронных эмиттеров обычно применяются циклотроны с максимальной энергией протонов от 10 до 19 MeV и дейтронов — 9 MeV и токами пучков на внешних мишенях от 40 до 100 μ A.

Однофотонная диагностика использует короткоживущие радиоизотопы рубидия (Rb-81), иода (I-123), индия (In-111), галлия (Tl-201), галлия (Ga-67), иттрия (Y-87) и другие с периодами полураспада от 4.7 до 78 h. При таких временах жизни производство радиофармпрепаратов и диагностика с их использованием могут быть

пространственно разделены (возможна транспортировка препаратов в пределах региона).

Применение циклотронов с максимальной энергией протонов до 30 MeV и дейтронов до 15 MeV с возможностью регулирования энергии частиц до уровня 0.6 от максимального значения существенно расширяет ассортимент производимых радионуклидов за счет увеличения выхода однофотонных короткоживущих радионуклидов и производства некоторых долгоживущих радиоизотопов натрия (Na-22), кобальта (Co-57), кадмия (Cd-109), церия (Ce-139). Такие циклотроны обеспечивают проведение исследований, направленных на создание новых радиоизотопов для ПЭТ-диагностики и радиационной терапии. Кроме того, при оснащении специальной мишенью, циклотрон можно использовать и для нейтронной терапии онкологических больных.

По имеющимся данным [1] уже к 2005 г. в мире насчитывалось более 600 действующих ПЭТ-центров с собственными ускорителями и несколько тысяч функционирующих ПЭТ-сканеров. В США количество отделений ПЭТ-диагностики составляло около 2000. В России функционировало только 4 ПЭТ-центра (2 в Москве и 2 в Санкт-Петербурге) и эксплуатировалось всего 13 ПЭТ-сканеров. К настоящему времени положение дел в этой области существенно не изменилось. Для сравнения в Германии с населением около 80 млн человек (почти в 2 раза меньше, чем в России) насчитывается более 80 ПЭТ-центров.

В период с 2001 по 2009 г. в ФГУП НИИЭФА им. Д.В. Ефремова создано три компактных циклотрона: СС-18/9, СС-12 и МСС-30/15 для ускорения отрицательных ионов водорода и дейтерия в диапазоне энергий от 12 до 30 MeV. Первым из этих циклотронов (СС-18/9) был создан в период с июня 2001 по октябрь 2003 г. Он рассчитан на ускорение H^- до энергии 18 MeV и D^- до энергии 9 MeV. Этот компактный циклотрон послужил базовой моделью при создании остальных ускорителей.

Основными требованиями, предъявляемыми к ускорителю такого назначения, являются простота и удобство эксплуатации; минимально возможные потери пучка при его ускорении и выводе из циклотрона и, как следствие,

незначительное радиационное загрязнение устройств, расположенных внутри ускорительной камеры, оптимальное энергопотребление, габаритные размеры и стоимость циклотрона.

Разработка и создание этих циклотронов открыли реальную возможность оснащения ПЭТ-центров в России отечественными ускорителями, отвечающими современным требованиям.

1. Описание конструкции циклотронов

Все циклотроны объединяются общей концепцией создания и внешним сходством. Характерными чертами их конструкций являются:

1) магнитопровод броневое типа цилиндрической формы,

2) полюсные наконечники с приваренными к ним кольцевыми пластинами являются крышками вакуумной камеры,

3) структура, формирующая магнитное поле, — четырехсекторная,

4) боковые накладки секторов, при помощи которых формируется изохронное поле, имеют расчетный профиль (без спиральности),

5) элементы центральной области, формирующие поле в центре электромагнита, имеют аксиальные отверстия для инъекции пучка и токоподвода к инфлектору; в балках электромагнита имеются аксиальные полости для размещения элементов системы внешней инъекции пучка,

6) центральная часть магнитопровода выполняет одновременно и функции корпуса камеры, имеет отверстия для вакуумной откачки, пробников пучка, обдирочных устройств, вывода пучков из ускорительной (вакуумной) камеры, элементов резонансной (ускоряющей) системы,

7) медианная плоскость расположена вертикально,

8) с целью обеспечения доступа к оборудованию, расположенному внутри вакуумной камеры (в полости магнитопровода), магнитопровод разделен на неподвижную и подвижную части, каждая из которых закреплена на отдельной опоре, базирующейся на общей раме,

9) подвижная опора установлена на специальные прецизионные рельсы и снабжена электромеханическим приводом,

10) расстояние, на которое смещается подвижная часть магнита (балка, полюсный наконечник, стойка, катушка обмотки) от неподвижной части, составляет 800 мм,

11) ускоряющая система полностью размещена внутри вакуумной камеры,

12) все циклотроны снабжены системами внешней инъекции пучков заряженных частиц, созданными на базе мультипольных источников (CUSP),

13) на всех циклотронах используются идентичные системы электропитания и управления,

14) вывод пучков заряженных частиц (протонов и дейтронов) осуществляется методом обдирки двух электронов на графитовых фольгах,

Технические характеристики компактных циклотронов СС-18/9, СС-12 и МСС-30/15

| Технические характеристики | СС-12 | СС-18/9 | МСС-30/15 |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|
| Энергия $H^- (D^-)$, MeV | 12 | 18/9 | 30/15 |
| Ток пучка $H^- (D^-)$, μA | 50 | 100/50 | 200/65 |
| Количество каналов вывода | 2 | 3 | 2 |
| Среднее поле B_{SP} , kG | 12.6 | 12.6 | 13.36 |
| Поле в секторе B_{hol} , kG | 19.5 | 19.0 | 19.7 |
| Поле в долине B_{dol} , kG | 5.0 | 5.0 | 5.7 |
| Диаметр полюса, cm | 90 | 115 | 140 |
| Зазор в холме, mm | 27 | 27 | 30 |
| Зазор в долине, mm | 130 | 118 | 150 |
| Радиус вывода пучка, cm | 39.9 | 47.6 | 57.1 |
| Угол раствора сектора, deg | 46 | 46.8 | 47 |
| Мощность обмотки, kW | 8 | 7 | 11 |
| Частота ВЧ-генератора, МН | 76.4 | 38.2 | 40.68 |
| Число дуантов (ВЧ-гармоника) | 2.4 | 2,(2 и 4) | 2,(2 и 4) |
| Амплитуда ВЧ-напряжения, kV | 40 | 35 | 38.7/28 |
| Угловая ширина дуантов, deg | 38 | 39 | 42 |
| Прирост энергии за оборот, keV | 92 | 87/60 | 100/65 |
| Мощность активных потерь в резонаторе / мощность ВЧ-генератора, kW | 12.5/15 | 11/25 | 18.2/30 |
| Тип ионного источника | CUSP | CUSP | CUSP |
| Ток ионов H^- / D^- из источника, mA | 1.0 | 1.0/0.5 | 1.4/0.7 |
| Эмиттанс пучка из источника (нормализованный), $\pi \cdot mm \cdot mrad$ | 0.25 | 0.3/0.15 | 0.35/0.18 |
| Энергия инъекции $H^- (D^-)$, keV | 14.5 | 18.4(9.2) | 19(9.5) |
| Средства вакуумной откачки, насосы | 1 криогенный и 2 турбо | 1 криогенный и 2 турбо | 2 криогенных и 2 турбо |
| Скорость откачки крионасоса (по водороду), l/s | 3200 | 3500 | 3500 · 2 |
| Рабочий вакуум, Torr | $4 \cdot 10^{-7}$ | $2 \cdot 10^{-7}$ | $2 \cdot 10^{-7}$ |
| Эффективность захвата (режим ускорения), % | 10 | 20/15 | 22/17 |
| Потери пучка на перезарядку, % | Не более 2.00 | Около 0 | Около 0 |
| Количество оборотов при ускорении | 130 | 207/160 | 300/230 |
| Эмиттанс выведенного пучка (нормализованный), $\pi \cdot mm \cdot mrad$ | ~ 10 | ~ 10 | ~ 10 |
| Разброс энергии в пучке, % | 2 | 2 | 2 |
| Потребляемая энергия, kW | 30 | 70 | 100 |
| Масса циклотрона, t | 13 | 22 | 41 |

15) предусмотрена возможность одновременного вывода пучков на две мишени,

16) с целью уменьшения возможной радиационной активации конструктивных элементов ускоряющей си-

стемы и стенок корпуса камеры, выполненных из меди и стали, установлены алюминиевые экраны, закрывающие эти элементы от бомбардировки их атомами и положительными ионами, образующимися в результате перезарядки отрицательных ионов на молекулах остаточного газа.

Наряду с общими чертами имеются и существенные отличия, обусловленные в первую очередь различиями в энергиях ускоряемых частиц, на что будет обращено внимание ниже при описании конструкций каждого из циклотронов.



Рис. 1. Циклотрон СС-18/9.

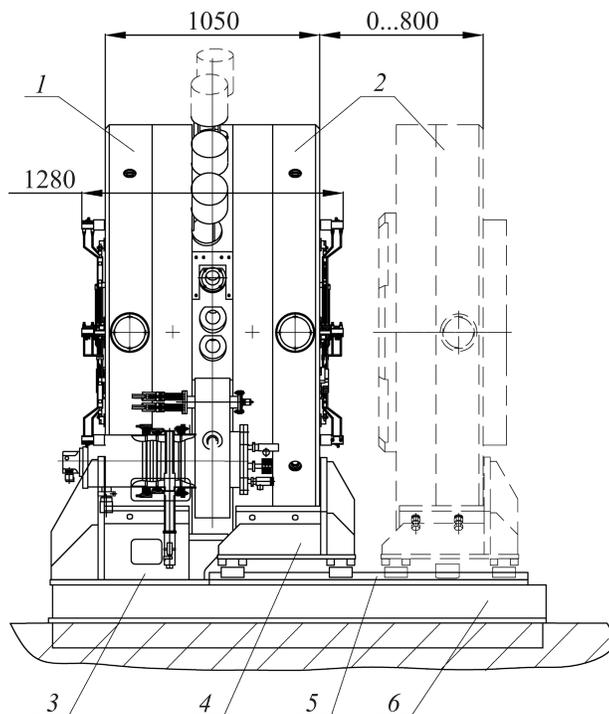


Рис. 2. Общий вид циклотрона СС-18/9: 1 — электромагнит, 2 — подвижная часть магнита, 3 — опора неподвижная, 4 — опора подвижная, 5 — рельсы, 6 — основание (рама).

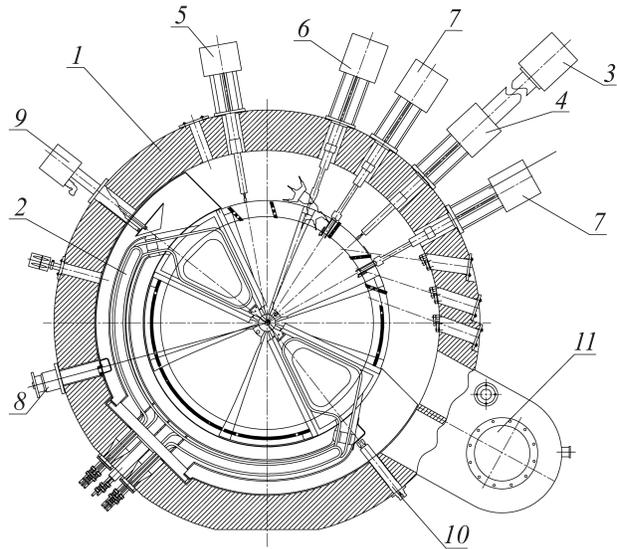


Рис. 3. Расположение оборудования в ускорительной камере циклотрона СС-18/9: 1 — корпус камеры, 2 — ускоряющая система, 3 — наладочный пробник, 4 — одноламельный пробник, 5 — двухламельный пробник, 6 — обдирочное устройство (ОУ1), 7 — обдирочное устройство (УО2), 8 — устройство ввода мощности, 9 — триммер АПЧ, 10 — двухэлектродный высокочастотный пробник, 11 — криогенный насос.

2. Циклотрон СС-18/9

Циклотрон СС-18/9 [2] рассчитан на ускорение отрицательных ионов водорода (H^-) до энергии 18 MeV с током пучка $100 \mu A$ и отрицательных ионов дейтерия (D^-) до энергии 9 MeV с током пучка $50 \mu A$.

На рис. 1, 2 показан общий вид циклотрона, на рис. 3 показано расположение оборудования в ускорительной камере.

2.1. Электромагнит циклотрона

Четыре сектора на каждом полюсе изготовлены фрезерованием из монолитных поковок, т. е. являются нераздельным продолжением полюсов. Высота сектора составляет 45.5 mm. Полюсные наконечники с приваренными к ним кольцевыми пластинами из немагнитной стали являются одновременно и крышками вакуумной камеры (см. рис. 4). Средняя часть магнитопровода (стойка) выполняет также функцию корпуса вакуумной (ускорительной) камеры [3] (см. рис. 3). Такое конструктивно-технологическое решение приводит к уменьшению газовыделения в вакуумную камеру за счет сокращения (почти в 2 раза по сравнению с вариантом с наложенными поверхностями, обращенной в вакуумный объем).

Изохронное поле циклотрона для ускорения H^- формируется при помощи шиммов, выполненных в виде накладок к боковым поверхностям секторов (см. рис. 4).

Поверхности шиммов, прилегающих к секторам, плоские (неплоскостность не более 0.05 mm). Противо-

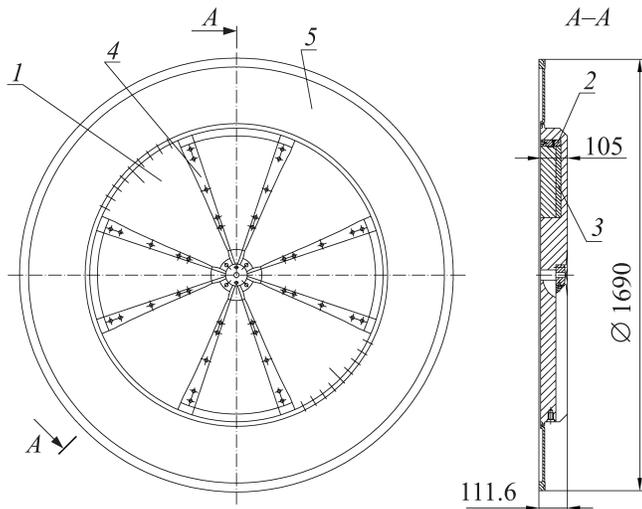


Рис. 4. Полюсный наконечник циклотрона СС-18/9 с шиммами: 1 — полюсный наконечник, 2, 3 — подвижные шиммы, 4 — неподвижные шиммы (боковые накладки к секторам), 5 — кольцевая пластина из немагнитной стали.

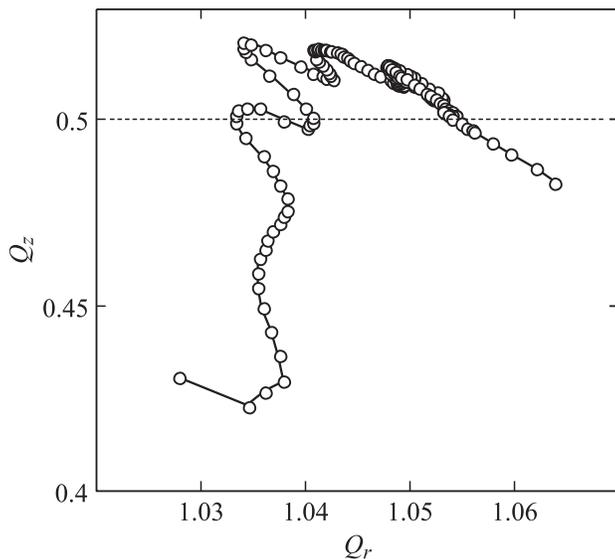


Рис. 5. Диаграмма бетатронных колебаний отрицательно заряженных ионов водорода в циклотроне СС-18/9. Пунктирная линия соответствует резонансу вертикальных колебаний $Q_z = 0.5$.

ложные поверхности, обращенные в долины, имеют профильную конфигурацию, определенную с помощью численного моделирования [4,5].

На первом этапе на основе численного моделирования магнитного поля и траекторного анализа определяется требуемая конфигурация этих поверхностей. Для коррекции возмущений поля, вызванных возможными геометрическими отклонениями при изготовлении и сборке магнитной структуры, формирующей изохронное поле, к расчетному профилю добавляется припуск (в пределах 0.5). С учетом величины припуска определяется конфигурация поверхностей изготавливаемых шиммов.

После сборки электромагнита проводятся работы по формированию требуемого изохронного распределения поля. Вычисляется радиальное распределение среднего по азимуту поля, полученное численное распределение сравнивается с требуемой изохронной зависимостью. Разность средних значений индукции определяет степень доработки боковых шиммов. Магнитные шиммы демонтируют с полюсов и обрабатывают на станке с цифровым программным управлением. Опыт создания циклотронов СС-18/9 показал, что при таком подходе достаточно одной-двух подрезок секторных накладок для формирования необходимого поля.

С целью получения изохронного поля для ускорения D^- дополнительно к секторным накладкам применены подвижные шиммы, которые размещены в нишах, выполненных в секторах с противоположной стороны рабочего зазора. Эти шиммы изготавливаются из магнитной стали по размерам, определенным методом математического моделирования, без припусков и соответственно без дальнейшей обработки. Для обеспечения режима ускорения H^- оба шимма каждого из секторов располагаются в полости вкладыша, заполняя ее целиком, и практически делают сектор монолитным.

В режиме ускорения D^- шимм, расположенный в полости вблизи от края полюса, перемещается внутрь полюса (вдоль силовых магнитных линий), создавая свободное пространство для радиального перемещения второго шимма. За счет перемещения этих шиммов внутри секторов образуются полости расчетной конфигурации, которые обеспечивают перераспределение магнитного поля для ускорения D^- .

На рис. 5 приведена диаграмма бетатронных колебаний.

2.2. Ускоряющая система циклотрона

В этом циклотроне применена ускоряющая система оригинальной конструкции [6] (см. рис. 6, 7).

Система состоит из С-образного разветвляющегося прямоугольного коаксиального резонатора, в средней

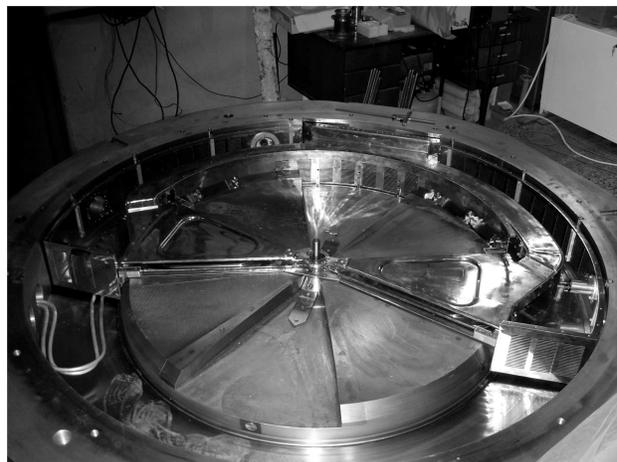


Рис. 6. Общий вид ускоряющей системы циклотрона СС-18/9.

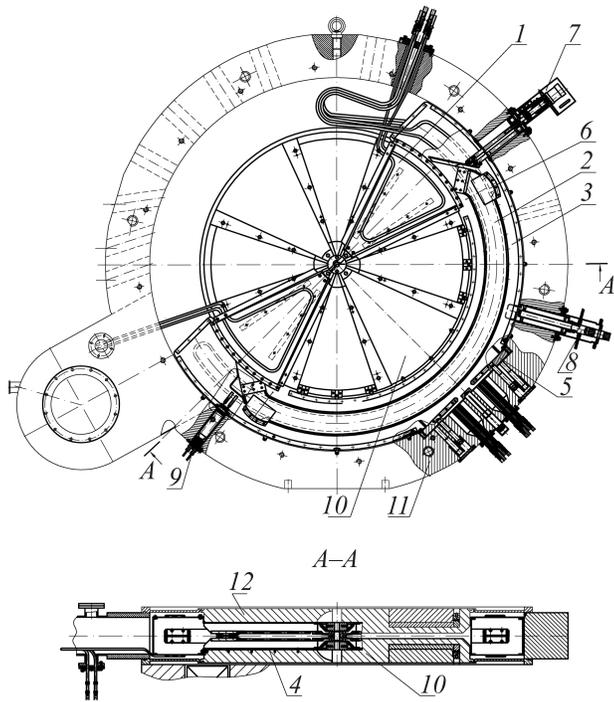


Рис. 7. Общий вид ускоряющей системы циклотрона СС-18/9: 1 — дуант, 2 — шток дуантный, 3 — корпус резонатора (внешний проводник), 4 — плакировка долины, 5 — пластина закорачивающая, 6 — конденсатор подстроечный, 7 — триммер АПЧ, 8 — устройство ввода мощности, 9 — пробник высокочастотный, 10 — полюсный наконечник, 11 — корпус камеры, 12 — смещаемый полюсный наконечник.

части которого внешний и внутренний проводники соединены между собой на закорачивающей пластине. К концам внешнего проводника прикреплены плакировки камеры, соединенные в центре между собой. К концам внутреннего проводника (С-образного дуантного штока) прикреплены дуанты, соединенные между собой перемычкой (пуллером), рис. 8.

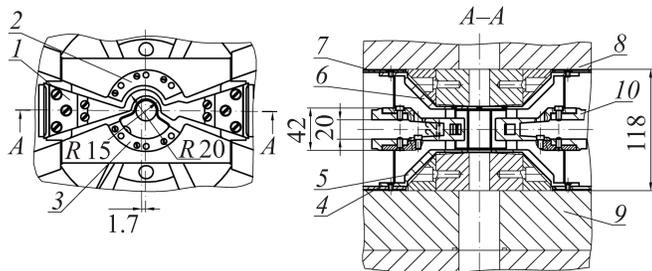


Рис. 8. Центральная область ускоряющей системы циклотрона СС-18/9: 1 — пуллер, 2 — экран, 3 — экран (корпус инфлектора), 4 — плакировка долины, 5 — плакировка магнита, 6 — съемная плакировка центра магнита, 7 — съемная плакировка долины, 8 — подвижный полюс магнита, 9 — неподвижный полюс магнита, 10 — дуант.

Такое конструктивное решение обеспечило возможность размещения ускоряющей системы полностью в ускорительной камере. В варианте с двумя отдельными резонансными системами, расположенными диаметрально противоположно относительно друг друга, было бы необходимо дуантные штоки и резонаторные баки выводить через отверстия в корпусе камеры (в магнитопроводе) и делать дополнительные вакуумно-плотные корпуса снаружи для их размещения. Предложенное решение позволило получить требующуюся рабочую частоту (38.2 Hz) при размахах внешнего и внутреннего проводников (плакировок резонатора и дуантного штока), обеспечивших сравнительно небольшую величину активных потерь (11 kW).

Дуанты и соответствующие плакировки размещены в долинах. Угловая протяженность дуанта составляет 38 deg.

После изготовления ускоряющей системы проводится ее наладка. Первоначально в атмосферных условиях проводятся „холодные“ радиотехнические измерения параметров системы: частоты, добротности и изменения напряжения вдоль ускоряющего промежутка. В случае несовпадения полученной частоты с требующейся проводится ее подгонка при помощи перемещения подстроечных конденсаторов и при необходимости устанавливаются дополнительные накладки на крышки дуантов или на плакировки дуантных штоков. В результате изменяются волновое сопротивление и, следовательно, частота ускоряющей системы. По завершении наладки системы на стенде она монтируется на штатное место в ускорительную камеру. Затем осуществляется сборка электромагнита вместе с ускорительной камерой и ускоряющей системой, проводятся вакуумная откачка камеры и испытание ускоряющей системы при полной нагрузке, передаваемой генератором высокой частоты в ускоряющую систему. Амплитуда дуантного напряжения составляет 35 kV. Измерения выполнены с помощью анализатора цепей HP8712ET.

Ускоряющая система в рабочем положении повернута относительно вертикальной оси циклотрона на 45 deg. Система полностью размещена в ускорительной камере, расположена в вертикальной плоскости и прикреплена к боковой поверхности корпуса камеры. При расположении резонансных систем в вертикальной плоскости прогибы дуантных крышек и дуантных штоков практически сводятся к нулю, что свойственно системе с традиционным размещением дуантов и штоков в горизонтальной плоскости. В последнем случае сведение к минимуму прогибов указанных элементов является значительной проблемой. Это обстоятельство приводит либо к необходимости увеличения апертуры дуанта, автоматически уменьшающейся за счет прогиба, либо увеличения толщины крышек дуанта с целью обеспечения необходимой жесткости. Как следствие, это может привести к увеличению расстояния между полюсами, что соответственно увеличит вес электромагнита или мощность, потребляемую магнитом. Кроме того, прогибы дуантных штоков и дуантов приводят к „уходу“

рабочей частоты и, как результат, к нестабильности работы ускоряющей системы.

Ускоряющая система снабжена устройством ввода высокочастотной мощности, двумя подстроечными конденсаторами (для неоперативной настройки системы на рабочую частоту), триммером автоматической подстройки частоты (АПЧ) и высококачественным пробником, которые размещены внутри резонатора и закреплены на боковой стенке корпуса вакуумной камеры (стойки магнитопровода). Триммер АПЧ обеспечивает автоматическую подстройку рабочей частоты ускоряющей системы в диапазоне 300 кГц. Система разрабатывалась с применением численного моделирования с использованием программы ISFFL3D [7]. Несовпадение расчетной (требуемой) частоты и полученной на изготовленной системе не превышало 2%. Расчетная добротность составляет 4200, измеренная добротность — 3500. Разница в результатах расчетов и измерений объясняется недостаточно высокой чистотой обработки токопроводящих поверхностей и тем, что в расчетах также не учтены активные потери в переходных контактах между элементами ускоряющих систем, т. е. причины, вызывающие увеличение сопротивления высокочастотному току.

2.3. Устройства диагностики ускоряемого пучка и устройства вывода пучка из ускорительной камеры

Циклотрон снабжен тремя пробниками для диагностики ускоряемого пучка. Один пробник содержит ΔR -электрод и предназначен для диагностики пучка в период наладки циклотрона. По существу этот пробник содержит два электрода, один из которых смещен относительно другого по радиусу на расстояние 2 мм. За счет разности уровней сигналов тока пучка, снимаемых с электродов при перемещении пробника по радиусу, можно определить степень центрирования орбит пучка, разделения орбит, размеров пучка, частоту радиальных бетатронных колебаний и другие характеристики пучка. Пробник снабжен приводом на базе шагового двигателя и имеет возможность перемещения электродов в радиальном направлении (от радиуса R , равного 50 мм, до края полюса). После наладки циклотрона этот пробник заменяется одноэлектродным штатным пробником, который предназначен для диагностики пучка только на конечном радиусе ускорения после проведения на циклотроне профилактических работ. Третий пробник снабжен двумя ламелями (электродами) и предназначен для проверки положения ускоряемого пучка относительно медианной плоскости на конечном радиусе ускорения.

В циклотроне предусмотрена возможность вывода пучка ускоренных частиц методом перезарядки в трех направлениях, причем можно осуществлять вывод в двух направлениях одновременно.

Циклотрон укомплектован тремя обдирочными устройствами. Каждое обдирочное устройство снабжено

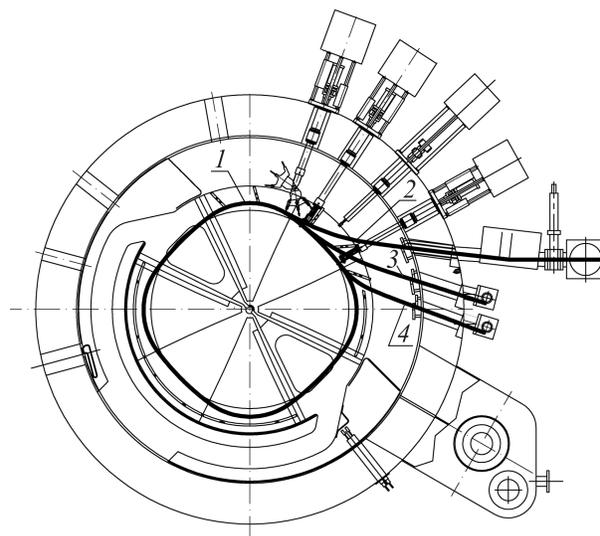


Рис. 9. Расчетные равновесная орбита и траектории вывода пучков в циклотроне СС-18/9 после их прохождения через обдирочную фольгу: 1 — равновесная орбита, 2–4 — траектории вывода пучков из ускорительной камеры.

тремя графитовыми фольгами, которые по мере их износа поочередно подводятся под пучок с помощью электромеханического привода без нарушения вакуума в камере ускорителя. Ресурс работы фольги составляет 2000 ч. Замена фольг производится (при нарушении рабочего давления в камере) со смещением подвижной части электромагнита относительно неподвижной части для обеспечения доступа внутрь камеры.

Герметизация подвижных штоков пробников и обдирочных устройств осуществляется при помощи сильфонов из нержавеющей (немагнитной) стали.

В процессе обдирки (перезарядки) отрицательный ион (H^- , D^-) теряет два электрона, изменяет траекторию движения, выводится из зоны ускорения через соответствующие каналы, выполненные в корпусе камеры, и поступает на мишень. Две мишени (ближние) устанавливаются непосредственно на корпусе камеры. Несколько мишеней (дальних) устанавливаются в мишенные боксы, расположенные на концах лучей системы транспортировки пучка. Расчетные траектории вывода пучков показаны на рис. 9.

2.4. Вакуумная система

В циклотроне СС-18/9 нет вакуумной камеры как самостоятельной части циклотрона — ее функцию выполняют стойка магнитопровода с отверстиями различного назначения (для вакуумной откачки, для устранения пробников, обдирочных устройств и т. д.) и полюсные наконечники с приваренными к ним пластинами из немагнитной стали. Герметизация состыкованных поверхностей крышек камеры с корпусом обеспечивается атмосферным давлением за счет применения резиновых уплотнителей. Принцип действия герметизации подроб-

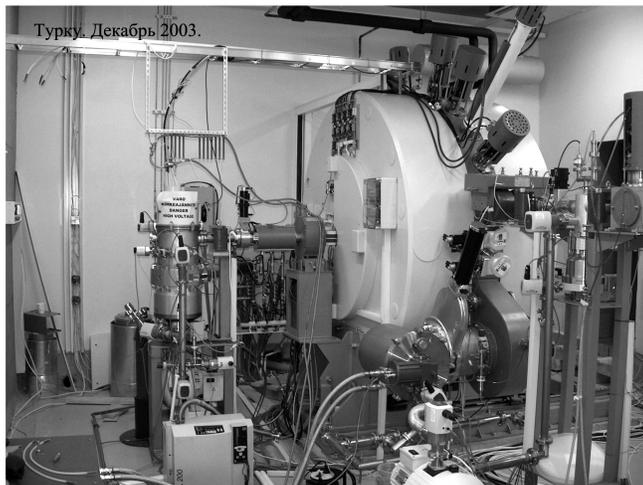


Рис. 10. Циклотрон СС-18/9 с системой инъекции пучка.

но описан в работе [8]. Вакуумная откачка камеры производится через отверстие малой протяженности, выполненное в корпусе камеры, к которому подсоединяется криогенный насос. Протяженность этого канала равна толщине корпуса камеры и составляет (в данном случае) величину 190 mm (см. рис. 3). Кольцевая полость, образованная пространством между полюсами и пластинами крышки камеры (рис. 4), отделяющими катушки электромагнита от вакуумного объема (коллектора), имеет пропускную способность, превышающую в 2 раза суммарную пропускную способность каналов, образованных долинами, холмами, зазорами между плакировками дуантов и т.д., примыкающими к коллектору. Такое конструктивное решение обеспечивает минимальный перепад давления в зоне ускорения пучка от центра полюса до конечного радиуса. Высокий вакуум ($\sim 2 \cdot 10^{-7}$ Торр) в ускорительной камере обеспечивается криососом. Скорость откачки по водороду составляет 3500 l/s. Форвакуумная откачка камеры производится безмасленным диафрагменным насосом.

2.5. Система инъекции пучка

Система внешней инъекции состоит из мультипольного источника ионов, вакуумной камеры, двух магнитных корректоров, соленоида, банчера с блоком высококачественного питания, электростатической линзы, спирального инфлектора и блоков электропитания и газопитания. Оборудование системы инъекции пучка расположено со стороны неподвижной части электромагнита на общей раме, установленной на подставке, прикрепленной к полу. Такая компоновка циклотрона с системой инъекции обеспечивает удобство обслуживания оборудования системы. На рис. 10 показан циклотрон СС-18/9 с системой инъекции пучка.

2.6. Системы, обеспечивающие работу основного оборудования циклотрона

Система высококачественного питания состоит из модуля стабилизации и управления и усилителя высококачественной мощности. Передача высококачественной мощности в ускоряющую систему осуществляется через гибкий фидер и устройство ввода мощности.

Система электропитания оборудования циклотрона построена на блоках производства фирмы Bruker, Glassman и Xantrex и размещена в шести стойках.

Автоматизированная система управления распределенного типа реализована на базе программирующего логического контроллера PLC производства фирмы Mitsubishi с использованием интерфейсов передачи данных PROFIBUS и ETHERNET. Интерактивное меню управляющего компьютера позволяет управлять всеми системами циклотрона и отображает информацию автоматически или по запросу оператора. Выбранная комплектация обеспечивает работу системы управления в режиме реального времени. Система управления, блокировки, сигнализации (УБС) реализована на том же контроллере PLC и не требует дополнительного оборудования. Система УБС является неотъемлемой частью системы автоматического управления циклотрона и не делает ее более надежной в эксплуатации. В качестве управляющего компьютера используется PC Pentium-4 с операционной системой Windows XP.

3. Циклотрон СС-12

Циклотрон СС-12 рассчитан на ускорение отрицательных ионов водорода до конечной энергии 12 MeV с током пучка $50 \mu\text{A}$ [9].

В процессе разработки этого циклотрона был учтен успешный опыт создания циклотрона СС-18/9 и использован ряд апробированных на нем технических решений.

Технические характеристики циклотрона приведены в таблице. На рис. 11, 12 показан общий вид циклотрона, на рис. 13 показано оборудование, расположенное в ускорительной камере.

3.1. Электромагнит циклотрона

Изохронное распределение магнитного поля этого циклотрона формируется только при помощи секторных накладок. Полюсный наконечник с шиммами показан на рис. 14. Высота холма составляет 51.5 mm.

Радиальные распределения расчетного и измеренного средних по азимуту полей в медианной плоскости приведены на рис. 15, диаграмма бетатронных колебаний показана на рис. 16.

3.2. Ускоряющая система циклотрона

Система состоит из двух соосных четвертьволновых резонаторов, расположенных в вертикальной плоскости под углом 40 deg, к вертикали (см. рис. 17, 18).

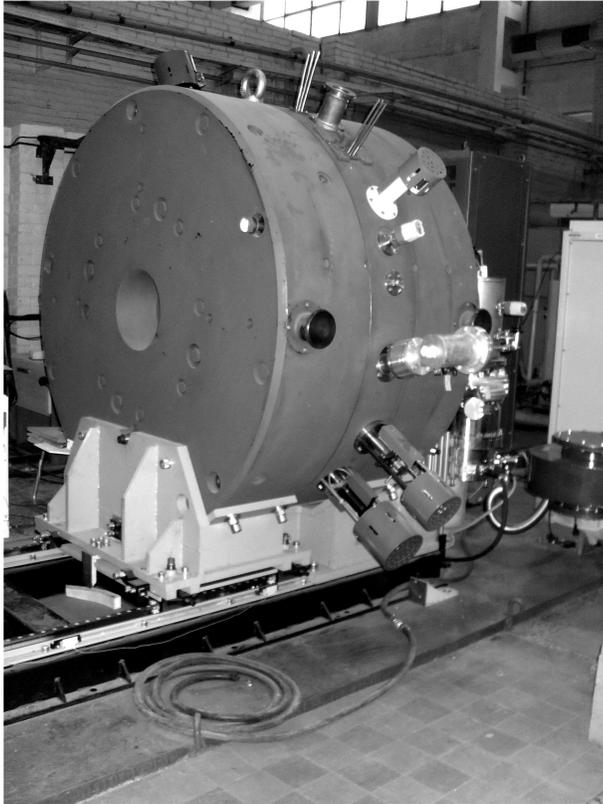


Рис. 11. Циклотрон СС-12.

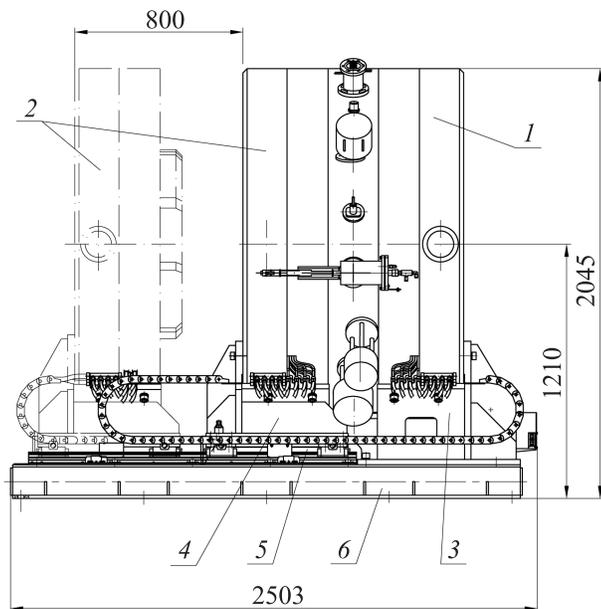


Рис. 12. Общий вид циклотрона СС-12: 1 — электромагнит, 2 — подвижная часть магнита, 3 — опора неподвижная, 4 — опора подвижная, 5 — рельсы, 6 — основание (рама).

Система размещена полностью в ускорительной (вакуумной) камере. Внешний проводник (стенки резонаторов) и дуантные штоки прикреплены к внутренней

стенке корпуса камеры. Дуанты угловой протяженностью 38 deg закреплены на дуантных штоках и соединены между собой в центре перемычкой (пуллером) (см. рис. 19).

Внешние проводники также соединены между собой попарно центральными плакировками: несъемные плакировки между собой и съемные плакировки между собой. Стенки резонаторов (несъемные и съемные плакировки) за пределами зоны ускорения пучка соединены между

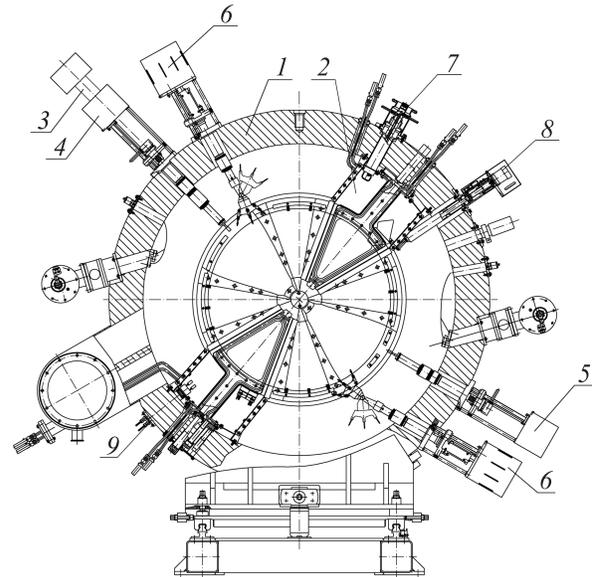


Рис. 13. Оборудование, расположенное в ускорительной камере циклотрона СС-12; 1 — корпус камеры, 2 — ускоряющая система, 3 — наладочный пробник, 4 — одноламельный пробник, 5 — двухламельный пробник, 6 — обдирочное устройство, 7 — устройство ввода мощности, 8 — триммер АПЧ, 9 — двухэлектродный высокочастотный пробник.

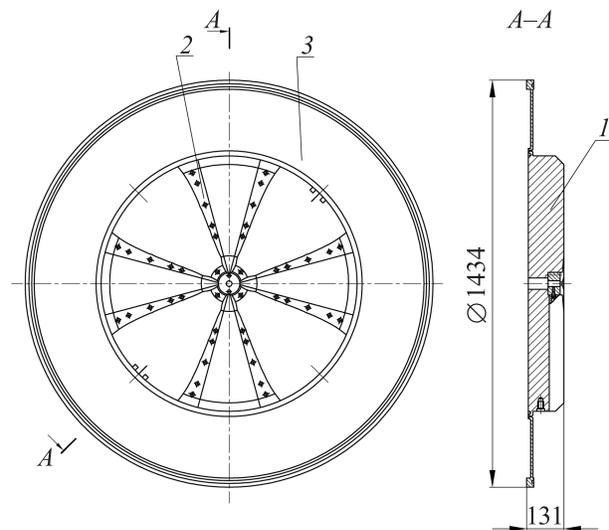


Рис. 14. Полосный наконечник с шиммами циклотрона СС-12: 1 — полюсный наконечник, 2 — неподвижные шиммы (боковые накладки к секторам), 3 — кольцевая пластина из немагнитной стали.

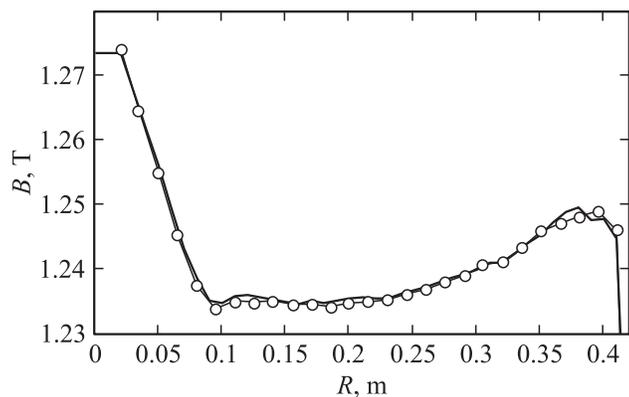


Рис. 15. Зависимости величины среднего поля от радиуса в циклотроне СС-12: сплошные линии — расчетная зависимость; кружки — результаты измерений.

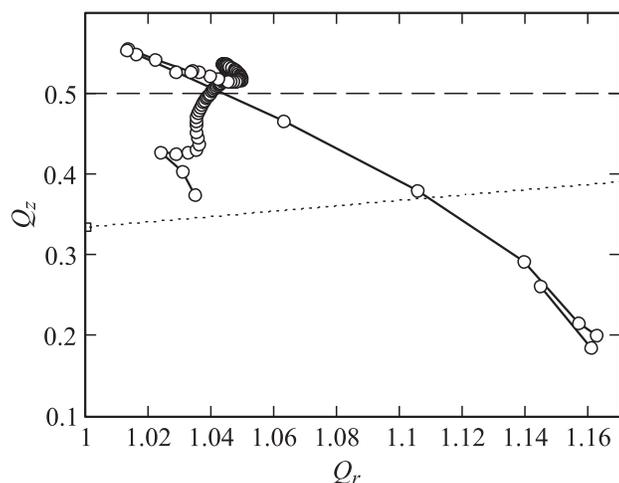


Рис. 16. Диаграмма бетатронных колебаний отрицательно заряженных ионов водорода в циклотроне СС-12. Значения частот получены из численных расчетов статистических равновесных орбит. Пунктирная линия соответствует резонансу вертикальных колебаний $Q_z = 0.5$. Точками изображена линия резонанса $Q_z = Q_r/3$.

собой и представляют собственно резонатор (замкнутый бак прямоугольного сечения).

Дуанты, закрепленные на штоках, имеют возможность неоперативной юстировки (как в продольном, так и в двух поперечных направлениях) при помощи юстировочных и фиксирующих болтов, соединяющих фланцы штоков с корпусом камеры. Внешние проводники (стенки резонаторов) плакировки штоков и дуантов выполнены из медного листа, имеют водяное охлаждение за счет припаянных к ним змеевиков, по которым циркулирует теплоноситель. Каркасы дуантных штоков, на которых закреплены плакировки, выполнены из немагнитной стали. Внешние и внутренние проводники соединены между собой на закорачивающей пластине медными переходными пластинами толщиной 0.5 посредством прижимных планок и болтов.

Амплитуда дуантного напряжения составляет 40 кВ.

Система снабжена устройством ввода высокочастотной мощности подстроечным конденсатором, триммером АПЧ и высокочастотным пробником, размещенным внутри резонаторов. Доступ к этим элементам обеспечивается за счет расстыковки подвижных и неподвижных частей электромагнита и демонтажа съемных плакировок.



Рис. 17. Общий вид ускоряющей системы циклотрона СС-12 (на стенде).

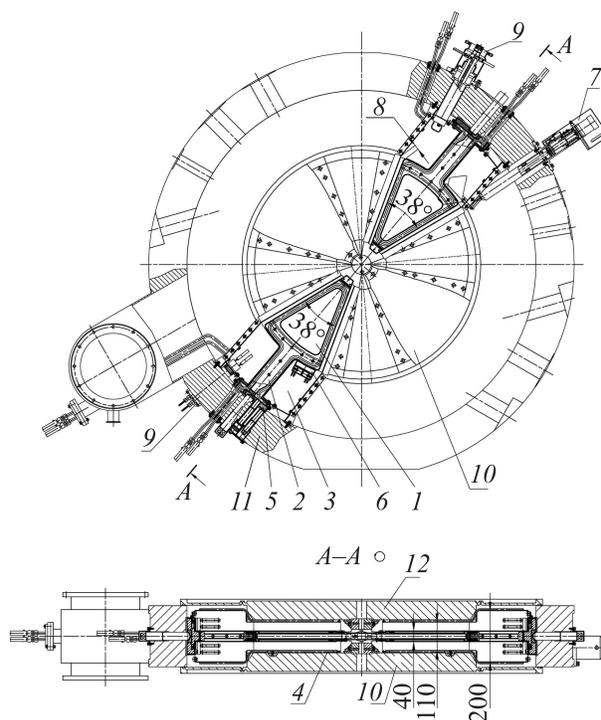


Рис. 18. Общий вид ускоряющей системы циклотрона СС-12: 1 — дуант, 2 — шток дуантный, 3 — корпус резонатора (внешний проводник), 4 — плакировка долины, 5 — пластина закорачивающая, 6 — конденсатор подстроечный, 7 — триммер АПЧ, 8 — устройство ввода мощности, 9 — пробник высокочастотный, 10 — полюсный наконечник, 11 — корпус камеры, 12 — смещаемый полюсный наконечник.

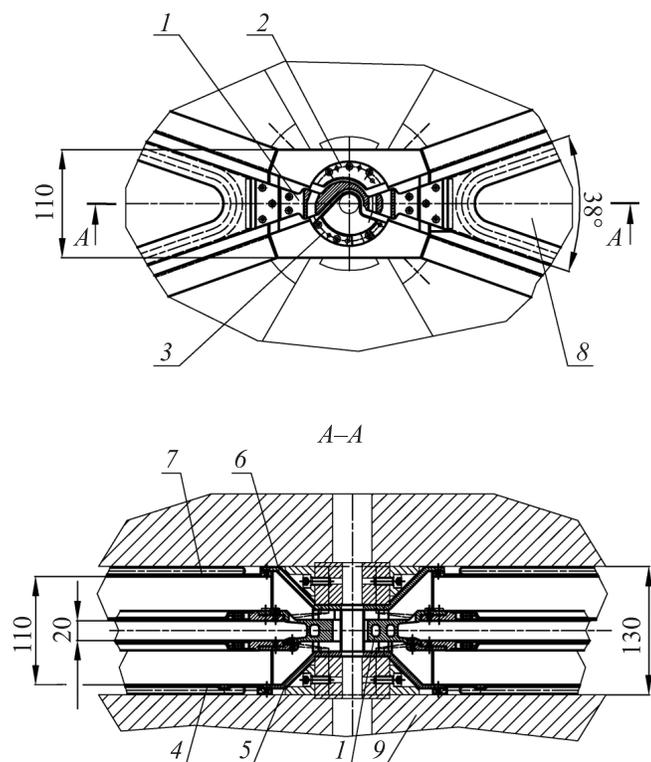


Рис. 19. Циклотрон СС-12: 1 — пуллер, 2 — экран, 3 — экран (корпус инфлектора), 4 — плакировка долины, 5 — плакировка центра магнита, 6 — съемная плакировка центра магнита, 7 — съемная плакировка долины, 8 — подвижный полюс магнита, 9 — неподвижный полюс магнита.

Система разрабатывалась с применением численного моделирования с использованием программы ISFEL3D. Несовпадение расчетной (требуемой) частоты и частоты, полученной на изготовленной системе, не превышало 2%. Рабочая частота системы составляет 76.4 МГц, расчетная добротность — 6500, измеренная добротность — 4000. Диапазон подстройки частоты триммером АПЧ составляет 200 кГц.

3.3. Устройства диагностики ускоряемого пучка и устройства вывода пучка из ускорительной камеры

На циклотроне предусмотрена возможность вывода пучка ускоренных частиц методом перезарядки в двух направлениях одновременно через соответствующие каналы, выполненные в корпусе камеры. Расчетные траектории вывода пучков показаны на рис. 20.

Циклотрон снабжен тремя пробниками для диагностики ускоряемого пучка. Диагностические пробники и обдирочные устройства конструктивно подобны соответствующим устройствам циклотрона СС-18/9.

3.4. Вакуумная система

Принципы построения вакуумной камеры системы циклотрона СС-12 аналогичны принципам, принятым для циклотрона СС-18/9.

3.5. Система инжекции пучка

Циклотрон оснащен упрощенным аналогом системы внешней инжекции пучка, разработанной для циклотрона СС-18/9. Система состоит из мультиполюсного ионного источника CUSP, вакуумной камеры, двух электростатических линз, ионопровода с корректирующими элементами и спирального инфлектора. На рис. 21 показан циклотрон СС-12 с системой инжекции пучка.

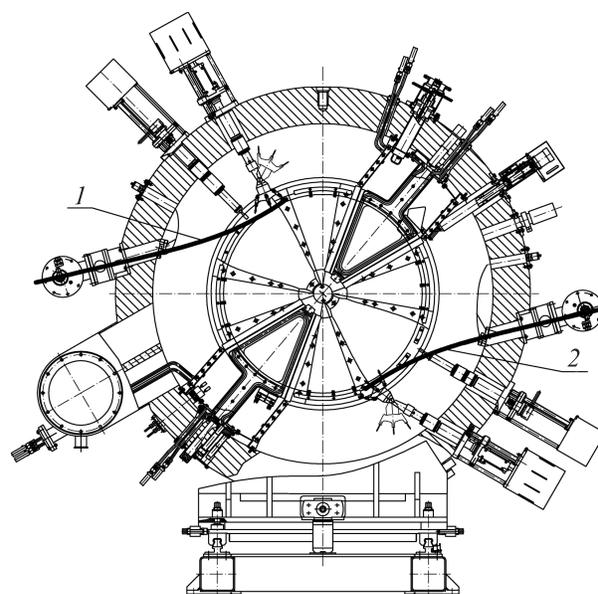


Рис. 20. Расчетные траектории выведенного пучка в циклотроне СС-12 (кривые 1, 2).

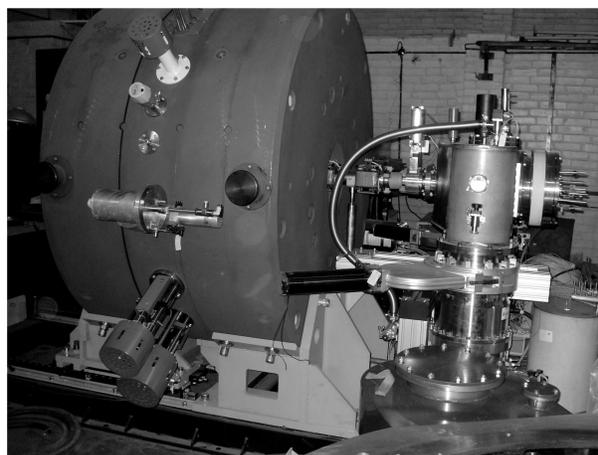


Рис. 21. Циклотрон СС-12 с системой инжекции пучка.

3.6. Системы, обеспечивающие работу основного оборудования циклотрона

Циклотрон СС-12 укомплектован системой высокочастотного питания, системой электропитания оборудования циклотрона, автоматизированной системой управления и системой УБС, которые подобны соответствующим системам циклотрона СС-18/9.

4. Циклотрон МСС-30/15

Циклотрон рассчитан на ускорение отрицательных ионов водорода до энергии 30 MeV с током пучка $100 \mu\text{A}$ и отрицательных ионов дейтерия до энергии 15 MeV с током пучка $5 \mu\text{A}$ [1,10]. При создании этого циклотрона также был учтен успешный опыт создания циклотронов СС-18/9 и СС-12 с заимствованием ряда технических решений, апробированных на них.

Циклотрон оснащен системой внешней инжекции пучка, созданной на базе мультиполюсного источника CUSP, и двумя лучами системы транспортировки пучка к дальним мишеням.

Применена система вывода пучков ускоренных частиц с помощью обдирочных устройств и возможностью вывода протонов в диапазоне от 18 до 30 MeV и дейтронов — от 9 до 15 MeV одновременно в двух противоположных направлениях.

На рис. 22, 23 показан общий вид циклотрона, на рис. 24 показано расположение оборудования в ускорительной камере.

4.1. Электромагнит циклотрона

Полюсные наконечники электромагнита снабжены системой шиммов содержащей: шиммы в виде боковых накладок к секторам; шиммы центральной области полюса;

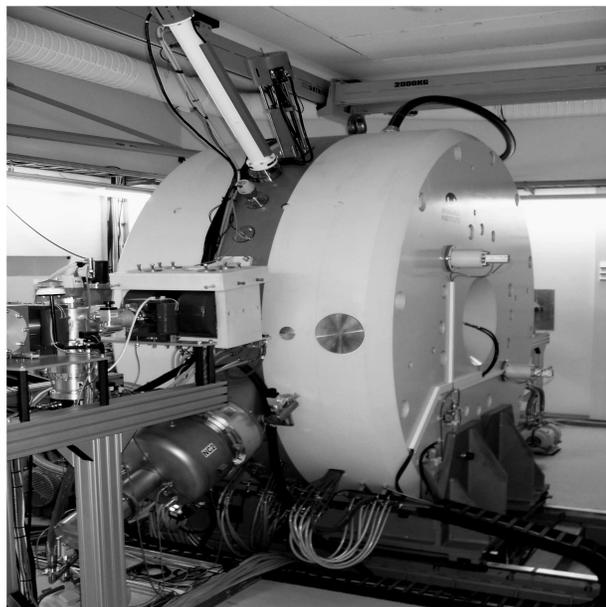


Рис. 22. Общий вид циклотрона МСС-30/15.

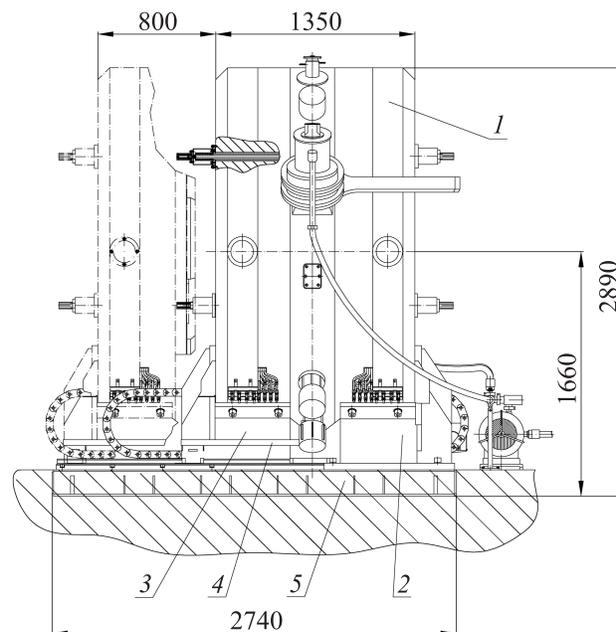


Рис. 23. Общий вид циклотрона МСС-30/15: 1 — электромагнит, 2 — неподвижная опора, 3 — подвижная опора, 4 — рельсы, 5 — основание (рама).

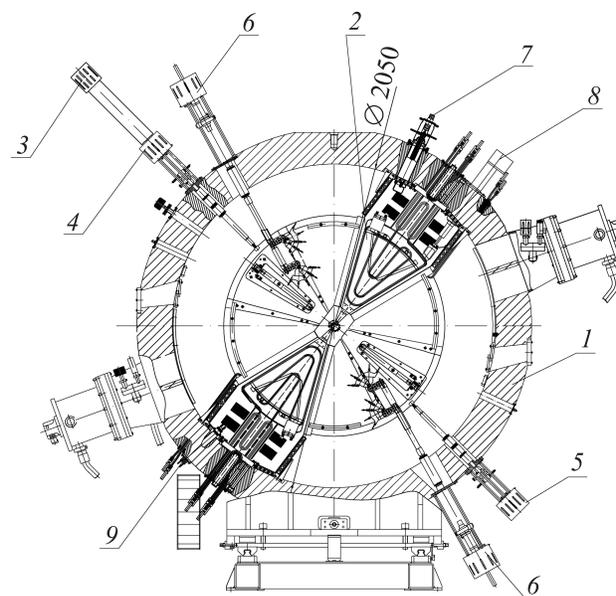


Рис. 24. Расположение оборудования в ускорительной камере циклотрона МСС-30/15: 1 — корпус камеры, 2 — ускоряющая система, 3 — наладочный пробник, 4 — пробник одноламельный, 5 — двухламельный пробник, 6 — обдирочное устройство, 7 — устройство ввода мощности, 8 — триммер АПЧ, 9 — двухэлектродный высокочастотный пробник.

поворотные шиммы, расположенные в двух парах долин; шиммы в виде плоских пластин, расположенные в двух парах долин. Требуемое распределение магнитного поля для ускорения двух частиц обеспечивается за счет выбора форм всех шиммов. Поверхности шиммов, прилегаю-

шие к секторам, выполнены плоскими (неплоскостность не более 0.05 mm). Противоположные поверхности, обращенные в долины, имеют профильную конфигурацию, определяемую с помощью численного моделирования. Была использована общая для циклотронов СС-18/9, СС-12, МСС-30/15 методика выбора формы шиммов с учетом возможного отклонения от заданной точности при изготовлении и сборке магнитной структуры. Эта методика базируется на сопоставлении распределения по радиусу среднего поля, полученного в результате численного моделирования и измерений.

При разработке электромагнита циклотрона МСС-30/15 найдено новое техническое решение (на уровне изобретения), суть которого заключается в том, что перестройка поля от режима ускорения D^- к режиму ускорения H^- обеспечивается при помощи четырех поворотных шиммов, которые размещены в свободных от дуантов долинах. Конструкция и принцип действия шиммов подробно представлены в описании изобретения [11]. Здесь уместно отметить лишь суть изобретения: шиммы представляют собой продольные половины тела вращения и имеют возможность поворота вокруг осей. Они помещены в желоба, выполненные в полюсных наконечниках электромагнита. Ось вращения каждого поворотного шимма компланарна медианной плоскости электромагнита и направлена радиально к центру полюса электромагнита с возможностью обеспечения поворота шиммов без нарушения вакуумных условий в ускорительной камере. В режиме ускорения D^- шиммы расположены в нишах „заподлицо“ с поверхностью долин. В режиме ускорения H^- шиммы повернуты вокруг осей на 180 deg и расположены над долинами. Шиммы изготавливаются из магнитной стали по размерам, определенным методом численного моделирования без припусков и соответственно без дальнейшей доработки. Поворот шиммов обеспечивается реечными приводами с подвижными штоками, герметизированными при помощи сильфонов.

Магнитная структура этого циклотрона заметно отличается от структуры циклотрона СС-18/9. Она является более технологичной в изготовлении и настройке, а также содержит в четыре раза меньшее число шиммов, а следовательно, и приводов для перемещения этих шиммов, см. рис. 25.

Зависимости индукции от радиуса, расчетная и полученная в результате формирования поля для H^- и D^- , показаны на рис. 26; на рис. 27 приведена диаграмма бетатронных колебаний.

Размещение поворотных шиммов только в двух парах долин в режиме ускорения H^- приводит к появлению второй гармоники с амплитудой 760 G. С целью уменьшения ее величины в другие две пары долин под плакировки камеры, были установлены неподвижные шиммы в виде пластин расчетной формы толщиной 14 mm. В итоге величина амплитуды второй гармоники сократилась вдвое. Как показано в работе [12], величина амплитуды второй гармоники до 1000 G не должна оказывать существенного влияния на динамику ускоряемого пучка.

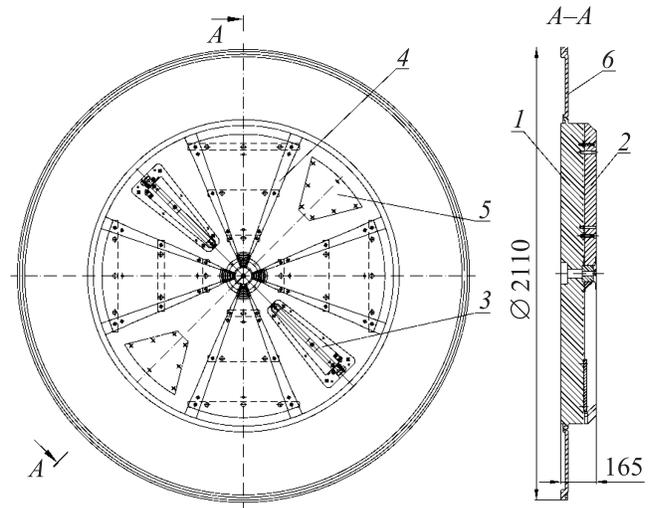


Рис. 25. Полюсный наконечник с шиммами циклотрона МСС-30/15: 1 — полюсный наконечник, 2 — сектор, 3 — подвижный шимм, 4 — неподвижный шимм (боковые накладки к секторам), 5 — шимм дополнительный, 6 — кольцевая пластина из немагнитной стали.

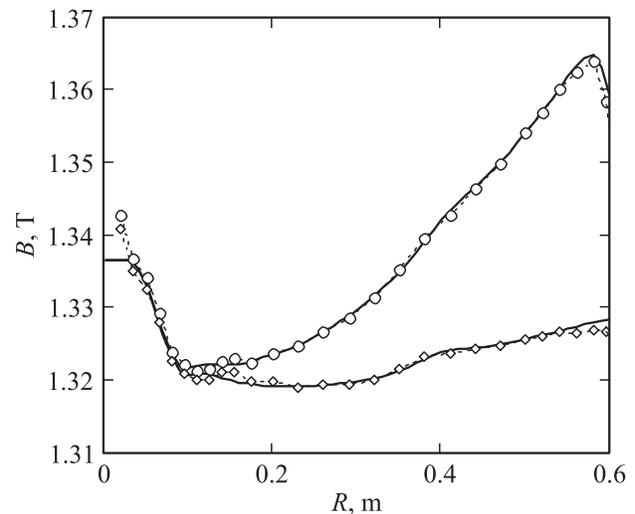


Рис. 26. Зависимости величины средней индукции магнитного поля от радиуса в циклотроне МСС-30/15. Верхняя кривая соответствует зависимости для H^- , нижняя — для D^- , сплошными линиями показаны расчетные зависимости; кружки и ромбы — результаты измерений.

Распределение величины второй гармоники в зависимости от радиуса для обоих положений поворотных шиммов показано на рис. 28.

В электромагните МСС-30/15 секторы изготовлены отдельно от полюсов, что диктуется экономической целесообразностью. В противном случае при таких размерах полюсов (диаметры $d = 1400$ mm) отходы механической обработки составили бы около полутора тонн металла, а затраты времени на фрезерование — десятки

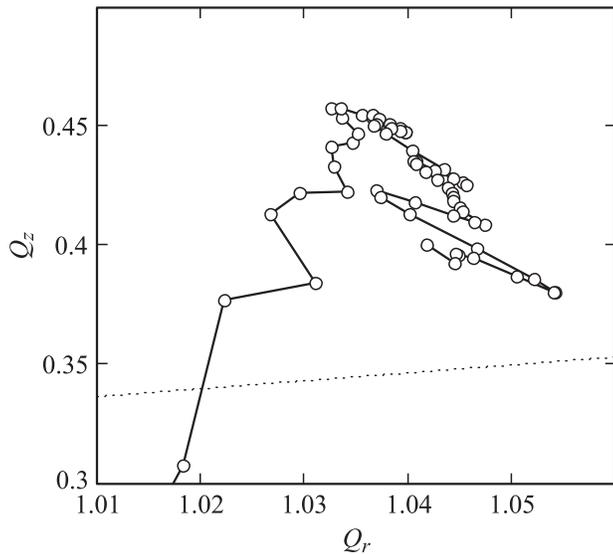


Рис. 27. Диаграмма бетатронных колебаний отрицательно заряженных ионов водорода в циклотроне МСС-30/15. Пунктирная линия соответствует резонансу $Q_z = Q_r/3$.

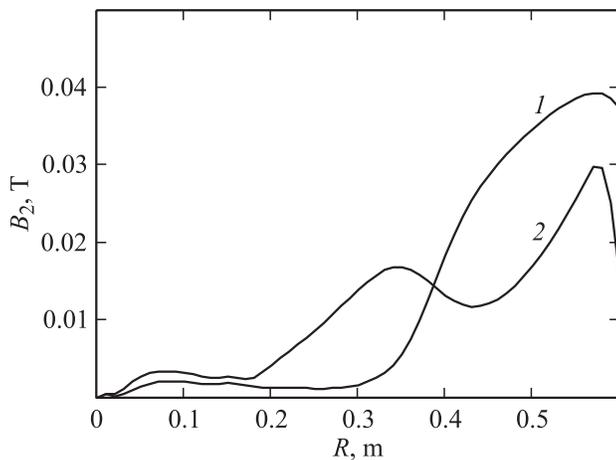


Рис. 28. Амплитуда второй гармоники в разложении магнитного поля в ряд Фурье в зависимости от радиуса в циклотроне МСС-30/15: 1 — режим ускорения H^- (поворотный шимм расположен над долиной), 2 — режим ускорения D^- (шимм расположен в нише полюса).

часов, что привело бы к удорожанию изготовления электромагнита.

С целью улучшения вакуумной откачки и тем самым уменьшения перепада давления в зоне ускорения пучка секторы отделены от полюсов полосами из немагнитной стали толщиной 5 мм и шириной 20 мм. Таким образом, создаются каналы для вакуумной откачки газов, выделяющихся сопрягаемыми поверхностями секторов и полюсов. Такое конструктивное решение способствует и сокращению времени для получения рабочего давления в ускорительной камере.

4.2. Ускоряющая система циклотрона

В циклотроне применена двухдуантная ускоряющая система, состоящая из двух резонансных систем в виде коаксиальных резонаторов прямоугольного сечения с дуантами угловой протяженностью 42 deg (см. рис. 29).

Система конструктивно подобна ускоряющей системе циклотрона СС-12. Отличие заключается в габаритных размерах системы и конфигурации отдельных ее элементов. Дуанты размещены в противоположных долинах. Общий вид центральной области показан на рис. 30.

Ускоряющая система работает в синфазном режиме. Рабочая частота составляет 40.68 МГц, ускоряющее напряжение — 40 кВ. Ускоряющая система в рабочем положении расположена в вертикальной плоскости под углом 40 deg к вертикали (см. рис. 24). Расчетная добротность составляет 6427, измеренная — 4170.

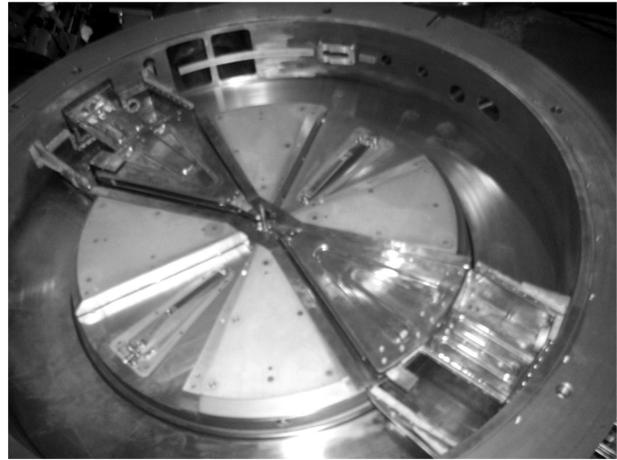


Рис. 29. Общий вид ускоряющей системы циклотрона МСС-30/15.



Рис. 30. Общий вид центральной области циклотрона МСС-30/15.

4.3. Устройства диагностики ускоряемого пучка и устройства вывода пучка из ускорительной камеры

Циклотрон снабжен тремя пробниками для диагностики ускоряемого пучка. Диагностические пробники конструктивно подобны пробникам, примененным для циклотронов СС-18/9 и СС-12.

Предусмотрена возможность вывода пучка ускоренных частиц в циклотроне в двух направлениях одновременно, для чего циклотрон снабжен двумя обдирочными устройствами.

В силу того что энергия выведенных из ускорительной камеры пучков регулируется за счет радиального перемещения обдирочной фольги, предусмотрена возможность такого применения (без нарушения вакуумных условий в ускорительной камере) за счет увеличения хода держателя фольги и усложнения его конструкции (см. рис. 24) по сравнению с предыдущими аналогами.

Расчетные траектории вывода пучков после их прохождения через обдирочную фольгу показаны на рис. 31.

4.4. Вакуумная система

В циклотроне МСС-30/15 подобно циклотронам СС-18/9 и СС-12 нет вакуумной камеры как самостоятельной части циклотрона. Ее функцию выполняют стойка магнитопровода с отверстиями в ней различного назначения (для вакуумной откачки, для установки пробников, обдирочных устройств и т.д.) и полюсные наконечники с приваренными к ним пластинами из немагнитной стали.

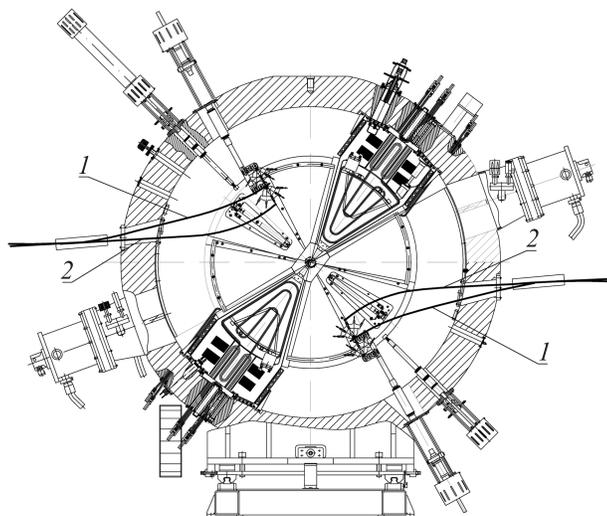


Рис. 31. Расчетные траектории вывода пучков в циклотроне МСС-30/15 после их прохождения через обдирочную фольгу: 1 — траектории, соответствующие энергии протонов 30 MeV; 2 — траектории, соответствующие энергии протонов 18 MeV.

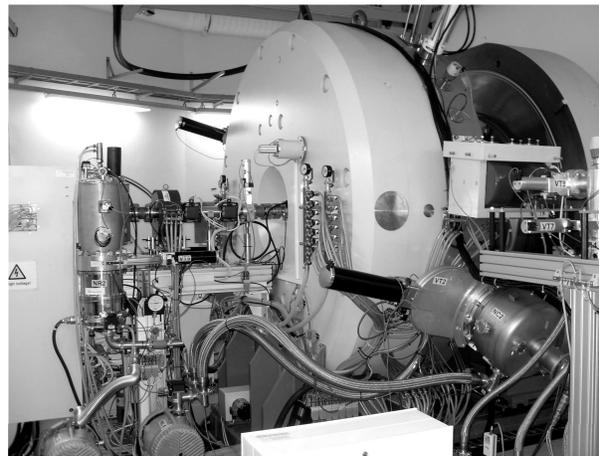


Рис. 32. Циклотрон МСС-30/15 с системой инъекции пучка.

4.5. Система инъекции пучка

Система инъекции пучка этого циклотрона идентична системе инъекции циклотрона СС-18/9. Циклотрон с системой инъекции пучка показан на рис. 32.

4.6. Системы, обеспечивающие работу основного оборудования циклотрона

Ускоритель укомплектован системой высокочастотного питания и системой электропитания оборудования циклотрона, которые подобны аналогичным системам СС-18/9.

Система автоматизированного управления состоит из двух стоек управления и обеспечения, трех блоков (блока управления высоковольтной стойкой инжектора, блока управления стойкой питания инжектора и блока драйверов шаговых двигателей) и пульта управления на основе двух РС-совместимых компьютеров. Система автоматизированного управления имеет структуру распределенного типа и состоит из контроллеров Mitsubishi и Advantech и компьютеров, каждый из которых отвечает за управление одной или несколькими подсистемами циклотрона.

Главным звеном системы управления является промышленный компьютер Advantech ACP-2000P4-30RE (центральный), который производит опрос подчиненных ему контроллеров, передает собранную информацию на компьютеры пульта управления, принимает, производит арбитраж и распределение команд, пришедших от компьютеров пульта управления.

Обмен данными центральный компьютер осуществляет по сетевым интерфейсам трех типов: сети верхнего уровня — Ethernet, сети нижнего уровня ProfiBus DP и RS-485. Сетью Ethernet связаны центральный компьютер, два компьютера пульта оператора и компьютер управления ВЧ-системой. Сетью ProfiBus соединены центральный компьютер, контроллеры управления устройствами циклотрона и ионопровода, вакуумной системой и системой водоохлаждения, блоки измерения

вакуума и стойка питания магнитов и линз. Сетью RS-485 связаны центральный компьютер, контроллеры блока управления стойкой питания инжектора и блока управления высоковольтной стойкой. Центральный компьютер обеспечивает синхронное измерение токов пучка с сенсоров датчика плотности тока пучка и передачу информации в компьютеры пульта управления, где происходит построение и отображение профиля пучка в ионопроводе.

Заключение

Разработанные в ФГУПЦ „НИИЭФА им. Д.В. Ефремова“ за относительно короткий промежуток времени циклотроны СС-18/9, СС-12 и МСС-30/15 для производства медицинских радиоизотопов открывают возможность оснащения ими создаваемых ПЭТ-центров как в России, так и за рубежом. Эти циклотроны отличаются рядом оригинальных конструктивных решений и, как следствие, обладают высокой конкурентной способностью.

Основными характерными отличиями конструкций этих циклотронов по сравнению с существующими циклотронами для тех же целей, разработанными ведущими зарубежными фирмами [13–15], являются:

1) в представленных циклотронах нет вакуумной камеры как „самостоятельной“ части — ее функцию выполняют стойки магнитопровода с отверстиями для вакуумной откачки установки пробников, обдирочных устройств и т.д., а также и полюсные наконечники с приваренными к ним пластинами из немагнитной стали,

2) ускоряющие системы полностью размещены в вакуумных объемах между полюсами и катушками электромагнитов, что упрощает формирование поля,

3) конструкции резонаторов ускоряющих систем выполнены бескаркасными из листовых медных плакировок,

4) вакуумная откачка камеры производится через боковые отверстия малой протяженности в стойке магнитопровода; предложено конструктивное решение, обеспечивающее высокую пропускную способность вакуумного тракта и минимальный перепад давления в зоне ускорения пучка от центра полюса до конечного радиуса,

5) циклотроны укомплектованы типовой системой внешней инжекции пучка, выполненной на базе мультитипольного источника, что обеспечивает радиационную чистоту установки;

6) общая компоновка циклотрона обеспечивает свободный доступ к оборудованию как снаружи, так и к размещенному внутри камеры.

Перечисленные отличия направлены на упрощение технологии изготовления и соответственно на снижение стоимости циклотронов, на повышение их потребительских качеств, таких как надежность, простота и удобство обслуживания, и на достижение высоких эргономических характеристик.

Циклотроны СС-18/9 и СС-12 поставляются заказчику в собранном виде (электромагнит, камера, ускоряющая система) совместно с основанием (рамой) и монтируются единым блоком, что снижает временные затраты на его монтаж и наладку. Возможен такой вариант поставки заказчику и циклотрона МСС-30/15.

Циклотрон СС-18/9 в АБО Академии г. Турку (Финляндия) укомплектован системой транспортировки выведенных пучков протонов и дейтронов, разветвленной на четыре луча, на концах которых установлены мишенные боксы. Циклотроны СС-18/9 в пос. Песочный г. Санкт-Петербурга и в г. Снежинске укомплектованы системой транспортировки пучков, разветвленной на три луча. Циклотрон МСС-30/15 Университета г. Ювяскюля (Финляндия) оснащен системой транспортировки пучка с двумя лучами.

Подтверждена на практике эффективность разработки основных систем циклотронов на основе применения методов математического моделирования. Сопоставление результатов измерений и расчетов показало, что поле магнитных систем циклотронов сформировано с точностью, определяемой величиной локальной ошибки $(2-10) \cdot 10^{-4} \text{ Т}$, при этом в основной области ускорения погрешность не превосходит величину нескольких гауссов при среднем уровне поля 1.3 Т.

Разработана эффективная технология настройки магнитной системы циклотронов, базирующаяся на использовании результатов математического моделирования и магнитных измерений, обеспечивающая минимальные временные затраты на формирование поля с требуемой точностью.

Подтверждена на практике правильность предложенной концепции построения циклотронов.

Список литературы

- [1] Богданов П.В., Васильченко И.Н., Ворогушин М.Ф., Гальчук А.В., Григоренко С.В., Мудролюбов В.Г., Строкач А.П., Сычевский С.Е. // Тр. XXI Российской конф. по ускорителям заряженных частиц RUPAC-2008. Звенигород, 2008. С. 361–363.
- [2] Белов В.П., Богданов П.В., Васильченко И.Н., Ворогушин М.Ф., Григоренко С.В., Зуев Ю.В., Кислов В.А., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Мудролюбов В.Г., Никифоровский А.В., Попов А.В., Севергин Ю.П., Силаев С.А., Стогов Ю.И., Строкач А.П., Сычевский С.Е., Шилкин Н.Ф. // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Электрофизическая аппаратура*. 2006. Т. 30. № 4. С. 27–29.
- [3] А. с. № 633167. Ускорительная камера циклотрона. П.В. Богданов. 1978. БИ № 43.
- [4] Kukhtin V., Lamzin E., Sytchevsky S. // XXXIV European Cyclotron Progress Meeting (ECMP 2005)/Belgrade, Serbia and Montenegro, 2005. P. 37.
- [5] Belov A.V., Belyakova T.F., Gornikel I.V., Kuchinsky V.G., Kukhtin V.P., Lamzin E.A., Semchenkov A.G., Shatil N.A., Sytchevsky S.E. // *IEEE Transact. on Appl. Superconduct.* 2008. Vol. 18. N 2. P. 1609–1612.
- [6] А. с. 324959. Резонансная система циклотронов. П.В. Богданов. 1972. БИ № 15.

- [7] *Silaev S.A.* // Proc. of the Int. Univ. Conf. „Electronics and Radiophysics of Ultra-Hight Frequencies“ St. Petersburg, 1999. P. 407–410.
- [8] А. с. № 749359. Ускорительная камера циклотрона. П.В. Богданов, И.Ф. Малышев. 1981. БИ. № 21.
- [9] *Богданов П.В., Будтов А.А., Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Гальчук А.В., Григоренко С.В., Давыдов В.Н., Кислов В.А., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Меньшов Д.Ю., Мудролюбов В.Г., Пономаренко В.И., Попов А.В., Сидоров А.В., Силаев С.А., Строкач А.П., Сычевский С.Е.* // Сб. докл. 11-го междунар. совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине (ICAA'05). СПб., 2005. С. 249–252.
- [10] *Heikkinen P.* // European Cyclotron Progress Meeting (ECPM XXXVII). Groningen, The Netherlands, 2009. P. 37.
- [11] Пат. РФ № 2373873 Н05Н 13/00 (2006.01). Изохронный циклотрон для ускорения нескольких типов заряженных частиц. Богданов П.В., Ворогушин М.Ф., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Строкач А.П., Сычевский С.Е. 2009. БИ. № 32.
- [12] *Zaremba S., Abs M., Conard E., Hardy L., Jongen Y., Ladeuze M., Lannoeye G.* Beam dynamics in newly designed cyclotrons at Ion Beam Applications. // Proc. EPAC90, Nice, 1990. Vol. 2. P. 1774–1776.
- [13] *Bol J.-L., Lacroix M., Lannoeye G., Ryckewaert G., Zaremba S., Chevalier A., Conard E. and Jongen Y.* // Proc. Europ. Particle Accelerator Conf. Rome, 1988. Vol. 2. P. 1488.
- [14] *Milton B.* et al. // Proc. XII Int. Conf. on Cycl. and their Appl. Berlin, Germany, 1989. P. 145–148.
- [15] *Hendry G.* et al. // Proc. IX Int. Conf. on Cyclotrons. CANIL, France, 1981. P. 125–128.