

P9-2009-111

Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбекян, С. Н. Дмитриев,
С. Л. Богомолов, О. Н. Борисов, И. А. Иваненко,
Н. Ю. Казаринов, В. И. Казача, И. В. Калагин, И. В. Колесов,
М. Н. Сазонов, А. В. Тихомиров, Й. Франко

**ПРОЕКТ ЦИКЛОТРОНА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЦ-110
ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ
И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ**

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

Гикал Б. Н. и др.

P9-2009-111

Проект циклотрона тяжелых ионов ДЦ-110
для промышленного применения и прикладных исследований
в области нанотехнологий

В ЛЯР ОИЯИ разработан проект циклотронного комплекса для проведения широкого спектра прикладных исследований в области нанотехнологий (темплетные технологии, трековые мембраны, модификация поверхности и др.). Комплекс включает в себя специализированный циклотрон тяжелых ионов ДЦ-110, позволяющий получать интенсивные пучки ускоренных ионов Ar, Kr и Xe с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон. Циклотрон оборудован системой внешней инжекции с источником ионов ЭЦР-типа, работающим на частоте 18 ГГц. Электромагнит циклотрона с диаметром полюса 2 м обеспечивает рабочее магнитное поле в рабочем зазоре на уровне 1,67 Тл. Фиксированная частота ВЧ-системы равна 15,5 МГц. Вывод пучка из циклотрона осуществляется электростатическим дефлектором. В работе представлены основные параметры циклотрона ДЦ-110.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2009

Gikal B. N. et al.

P9-2009-111

The Project of the DC-110 Heavy Ion Cyclotron for Industrial
Application and Applied Research in the Nanotechnology Field

The project of the DC-110 cyclotron facility to provide applied research in the nanotechnologies (track pore membranes, surface modification of materials, etc.) has been designed by the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna). The facility includes the isochronous cyclotron DC-110 for accelerating the intensive Ar, Kr, Xe ion beams with 2.5 MeV/nucleon fixed energy. The cyclotron is equipped with system of axial injection having 18 GHz ECR ion source. The cyclotron electromagnet with pole of 2 m diameter creates magnetic field of 1.67 T. The RF system operates at fixed frequency 15.5 MHz. The extraction system is equipped with electrostatic deflector. The main parameters of DC-110 cyclotron are presented in this report.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2009

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований, Дубна, разработан проект циклотронного комплекса для производства трековых мембран. Проект включает специализированный компактный ускоритель тяжелых ионов ДЦ-110 с использованием инжектора тяжелых многозарядных ионов на базе ионного источника ЭЦР-типа. Ускорительный комплекс позволит получать интенсивные пучки ускоренных ионов Ag, Kr и Xe с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон, необходимые для производства трековых мембран на основе полимерных пленок толщиной до 30 мкм.

ОПИСАНИЕ И КОМПОНОВКА ЦИКЛОТРОНА ДЦ-110

Проект ДЦ-110 основывается на новых разработках и технологии, полученных в ходе создания и эксплуатации таких циклотронов ЛЯР ОИЯИ, как У-400, У-400М, ИЦ-100, ДЦ-72, ДЦ-60 [1–3]. Для получения пучков ионов аргона, криптона и ксенона с энергией 2,5 МэВ/нуклон выбран циклотрон с диаметром полюса 2,0 м. В качестве ускоряемых ионов приняты $^{40}\text{Ar}^{6+}$, $^{86}\text{Kr}^{13+}$ и $^{132}\text{Xe}^{20+}$, имеющие близкие отношения массы к заряду: 6,667; 6,615 и 6,6. Это позволяет реализовать режим ускорения на фиксированной частоте ускоряющей системы 15,506 МГц при изменении магнитного поля в

Таблица 1. Основные параметры рабочих режимов циклотрона

Ускоряемые ионы	$^{40}\text{Ar}^{6+}$	$^{86}\text{Kr}^{13+}$	$^{132}\text{Xe}^{20+}$
Отношение массы к заряду иона, A/Z	6,667	6,615	6,6
Энергия ионов, МэВ/нуклон	2,52	2,52	2,52
Уровень магнитного поля, Тл	1,683	1,67	1,666
Частота ускоряющего напряжения, МГц	15,506	15,506	15,506
Планируемая интенсивность выведенного пучка ионов, мкА	12	13	10

пределах 130 Гс. Циклотрон не предусматривает вариацию энергии ионов и изменение режима ускорения.

СИСТЕМА АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА

Система аксиальной инъекции циклотрона оборудована источником ионов ЭЦР-типа. Для получения энергии ускоряемых ионов около 2,5 МэВ/нуклон при выбранном уровне магнитного поля 1,67 Тл в циклотроне с 2-м полюсом необходимо получить ионы из ионного источника с отношением массы к заряду около 6,6. Требование к интенсивности пучка из ионного источника определяется необходимой интенсивностью пучка на мишени. Исходя из экспериментальных данных, полученных на других ускорителях, коэффи-

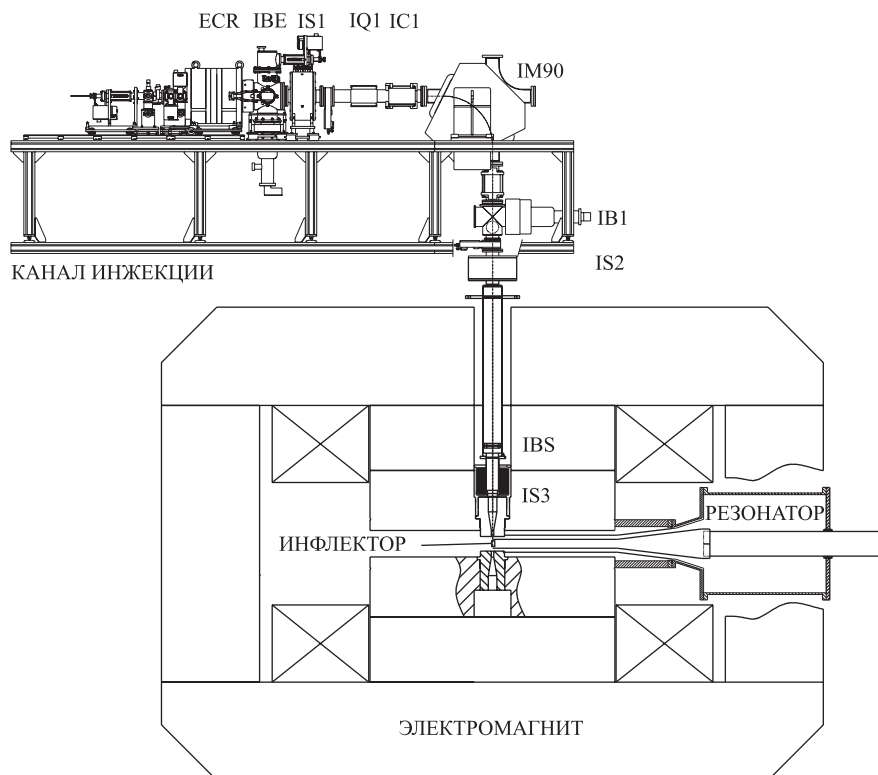


Рис. 1. Схема циклотрона ДЦ-110 с системой аксиальной инъекции пучка из ЭЦР-источника

коэффициент трансмиссии пучка из ионного источника до мишени можно оценить как 6–10 % в зависимости от тока ускоряемого пучка. На циклотроне ДЦ-110 предполагается использование ЭЦР-источника с частотой 18 ГГц, который позволяет получать высокую интенсивность пучков ионов $^{84}\text{Kr}^{13+}$ и $^{132}\text{Xe}^{20+}$. Источник может быть создан как с медными («теплыми»), так и со сверхпроводящими обмотками. С учетом возможности использования циклотрона в промышленном цикле производства трековых мембран в ЛЯР разработан специализированный источник ионов, работающий на частоте 18 ГГц, с медными обмотками, имеющий повышенную надежность. Параметры источника приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры пучков ЭЦР-источника с частотой 18 ГГц

Ион	A/Z	Максимальная интенсивность пучка, мкА	Интенсивность пучка в режиме промышленного облучения, мкА
$^{40}\text{Ar}^{6+}$	6,667	1000	500
$^{86}\text{Kr}^{13+}$	6,615	500	250
$^{132}\text{Xe}^{20+}$	6,6	300	150

Полученный в источнике пучок ионов транспортируется в центр циклотрона по системе аксиальной инжекции. В состав системы входят соленоиды S1 и S2, квадрупольная линза Q1, анализирующий магнит ВМ-1, синусоидальный банчер, диагностические элементы и вакуумные средства откачки. Для поворота инжектируемого пучка из вертикального канала в медианную плоскость циклотрона используется электростатический спиральный инфлектор, расположенный в центре циклотрона. Напряжение инжекции может меняться в пределах от 15 до 25 кВ. Компоновка циклотрона ДЦ-110 и системы аксиальной инжекции пучка из ЭЦР-источника приведена на рис. 1.

МАГНИТ ЦИКЛОТРОНА

Магнитная система циклотрона ДЦ-110 создается на базе электромагнита СП-172. Магнит имеет Ш-образную форму и состоит из ярма, полюсных сборок и обмоток возбуждения. Диаметр полюса магнита — 2 м. Ведущее и фокусирующее магнитные поля в рабочем зазоре формируются только за счет шиммирования четырех пар секторов. Использование радиальных корректирующих катушек не предполагается. Для коррекции оптимального положения орбиты на выводном радиусе устанавливаются две сборки азимутальных

Таблица 3. Основные параметры магнита циклотрона ДЦ-110

Габариты магнита: длина/ширина/высота, мм	5400/2100/3840
Диаметр полюса, мм	2000
Зазор между полюсами, мм	224
Количество секторов	4
Зазор между секторами, мм	42
Угловая протяженность сектора, град	51,6
Отношение радиуса вывода к радиусу полюса	0,88
Магнитное поле в центре, Тл	1,67
Среднее магнитное поле на радиусе вывода, Тл	1,6745
Флаттер	0,12
Сечение обмотки (гориз. × верт.), мм	290,8 × 290,8
Число витков в основной обмотке	2x180
Ток основной обмотки, А	1100
Азимутальные корректирующие катушки	2 секции по 2 пары
Вес электромагнита, т	210
Мощность системы питания электромагнита, кВт	65

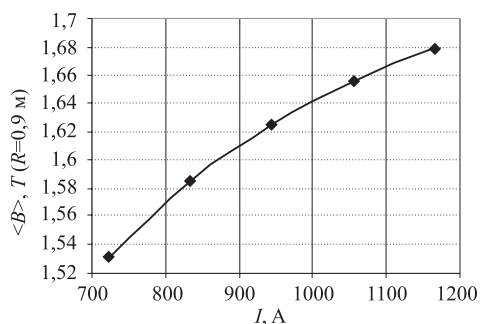


Рис. 2. Вид сектора ДЦ-110 с боковым профилированием

корректирующих катушек. Переход от одного режима работы к другому осуществляется за счет изменения уровня среднего поля в пределах 130 Гс.

Флаттер магнитного поля на уровне 0,12 обеспечивает фокусировку пучка ионов в процессе ускорения. При этом частоты свободных колебаний $Q_r = 1,01$ и $Q_z = 0,35$ не приближаются к опасным резонансным значениям. Основные параметры магнитной структуры приведены в табл.3 и на рис. 2 и 3.

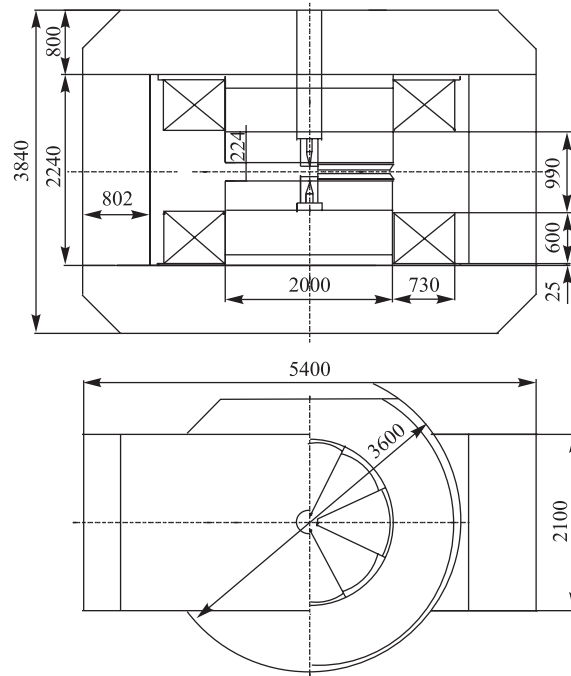


Рис. 3. Схема и основные размеры магнита циклотрона ДЦ-110

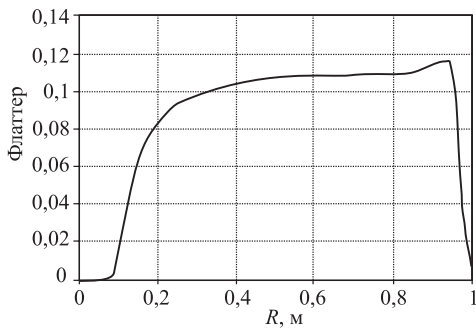


Рис. 4. Флаттер магнитного поля

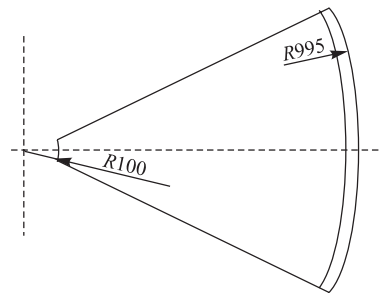


Рис. 5. Вид сектора ДЦ-110 с боковым профилированием

Устойчивость ускорения в циклотроне обеспечивается изохронной формой магнитного поля. Для режима ускорения пучка ионов $^{86}\text{Kr}^{13+}$ проведен расчет изохронного распределения магнитного поля по методу Гордона [4]. Этот режим ускорения взят за основу при формировании магнитного поля

железными массами. Изохронное распределение магнитного поля по радиусу должно быть получено за счет формы боковых шимм секторов и выбора формы внутренней и внешней фасок секторов (рис. 4, 5). Остальные два режима ускорения пучков ионов $^{40}\text{Ar}^{6+}$ и $^{132}\text{Xe}^{20+}$ будут получены только за счет подбора уровня тока в основной обмотке. При этом уровень магнитного поля будет изменяться на +130 Гс и -40 Гс относительно исходного. Такое небольшое изменение уровня магнитного поля не приводит к искажению его радиального распределения. Малое отличие в значениях отношения массы к заряду ионов $^{40}\text{Ar}^{6+}$, $^{86}\text{Kr}^{13+}$, $^{132}\text{Xe}^{20+}$ позволяет использовать полученную изохронную форму поля для всех трех режимов ускорения без использования радиальных корректирующих катушек.

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА ЦИКЛОТРОНА

В циклотроне ДЦ-110 для получения ускоряющего напряжения на дуантах применяется резонансная система, состоящая из двух четвертьволновых коаксиальных резонаторов, двух 45° -х дуантов, петли связи резонатора и фидерной линии генератора и триммера ручной и автоматической подстройки резонансной частоты. Дуанты располагаются в противоположных долинах и имеют между собой перемычку в центре циклотрона, что позволяет питать резонансную систему от одного ВЧ-генератора. Роль антидуантов выполняют

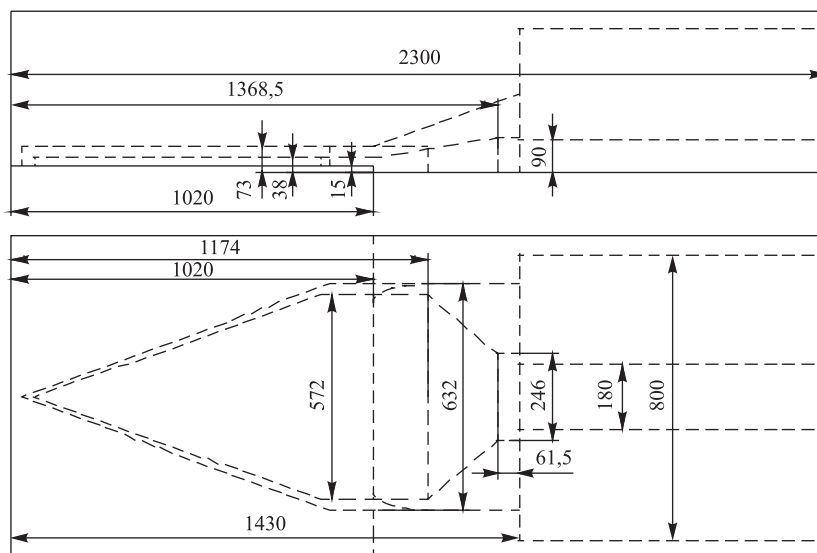


Рис. 6. Расчетные геометрические размеры резонансной системы ДЦ-110

Таблица 4. Общие характеристики ВЧ-системы

Частота обращения ионов, МГц	3,8765
Гармоника	4
Частота ВЧ-поля, МГц	15,506
Количество дуантов	2
Количество генераторов	1
Длина резонатора L , мм	2300
Мощность потерь ($U = 50$ кВ) P , кВт	4,16
Напряжение на дуантах, кВ	50
ВЧ-мощность генератора, кВт	20

плакировки долин, в которых расположены дуанты. Расчетные параметры резонансной системы циклотрона ДЦ-110 приведены в табл. 4 и на рис. 6.

ВЫВОД ПУЧКА

Электростатический дефлектор с напряженностью электрического поля 55–65 кВ/см будет использоваться для вывода пучка ионов из циклотрона. Он расположен в долине магнита и имеет азимутальную протяженность 34° (≈ 520 мм). Дефлектор представляет собой две пластины с заданной кривизной поверхностей («септумная» и «потенциальная»), между пластинами создается электрическое поле, отклоняющее пучок. Расстояние между пластинами — 10 мм. Септумная пластина охлаждается водой. Точность установки и возможность перемещения краев дефлектора определяются необхо-

Таблица 5. Общие характеристики ВЧ-системы

Напряжение на потенциальной пластине, кВ	55–65
Длина потенциальной пластины, мм	400
Длина септумной пластины, мм	440
Толщина септумной пластины, мм	0,3
Радиус кривизны пластин, мм	1800
Высота пластин, мм	50
Зазор между пластинами, мм	10
Перемещение входа и выхода дефлектора, мм	± 15
Точность установки дефлектора, мм	± 1

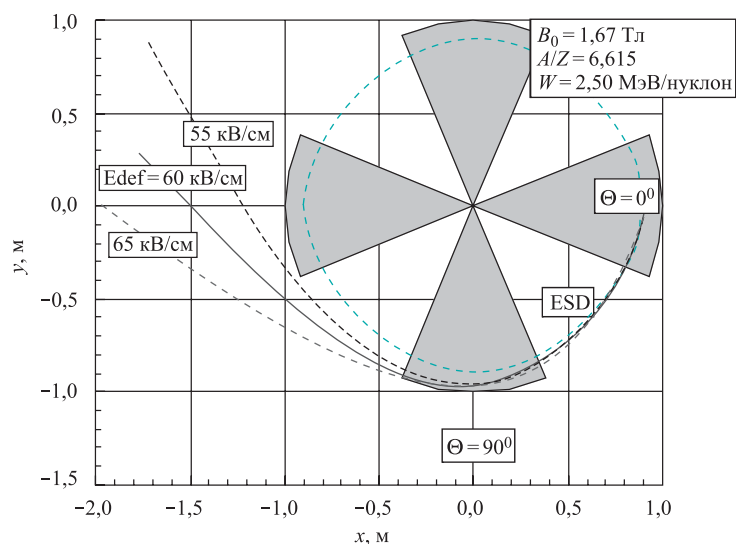


Рис. 7. Выводная траектория ионов $^{86}\text{Kr}^{13+}$

димостью настройки на «ядро» пучка и согласованием выводной траектории с геометрией дефлектора. Выводная траектория пучка ионов $^{86}\text{Kr}^{13+}$ с энергией 2,5 МэВ/нуклон показана на рис. 7, основные параметры электростатического дефлектора — в табл. 5.

Для фокусировки пучка в процессе вывода на участке сильно спадающего магнитного поля циклотрона используется пассивный магнитный канал. Магнитный канал устанавливается в соответствии с выводной траекторией. Для согласования положения канала и выводной траектории предусмотрена возможность радиального перемещения входа и выхода канала на ± 15 мм от номинального положения. Точность установки канала ± 1 мм. Для настройки системы вывода пучка используется пробник вывода, расположенный между дефлектором и магнитным каналом. Он предназначен для определения положения, интенсивности и горизонтального распределения выводимого пучка перед входом в магнитный канал.

КАНАЛЫ ОБЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Система каналов транспортировки ускоренных и выведенных пучков циклотрона ДЦ-110 предназначена для формирования пучка, обеспечивающего равномерное облучение тяжелыми ионами поверхности стационарных мишеней и движущихся пленок шириной до 600 мм. В состав системы транспортировки пучка входят общий начальный участок, коммутирующий магнит, два идентичных канала с установками для облучения полимерных

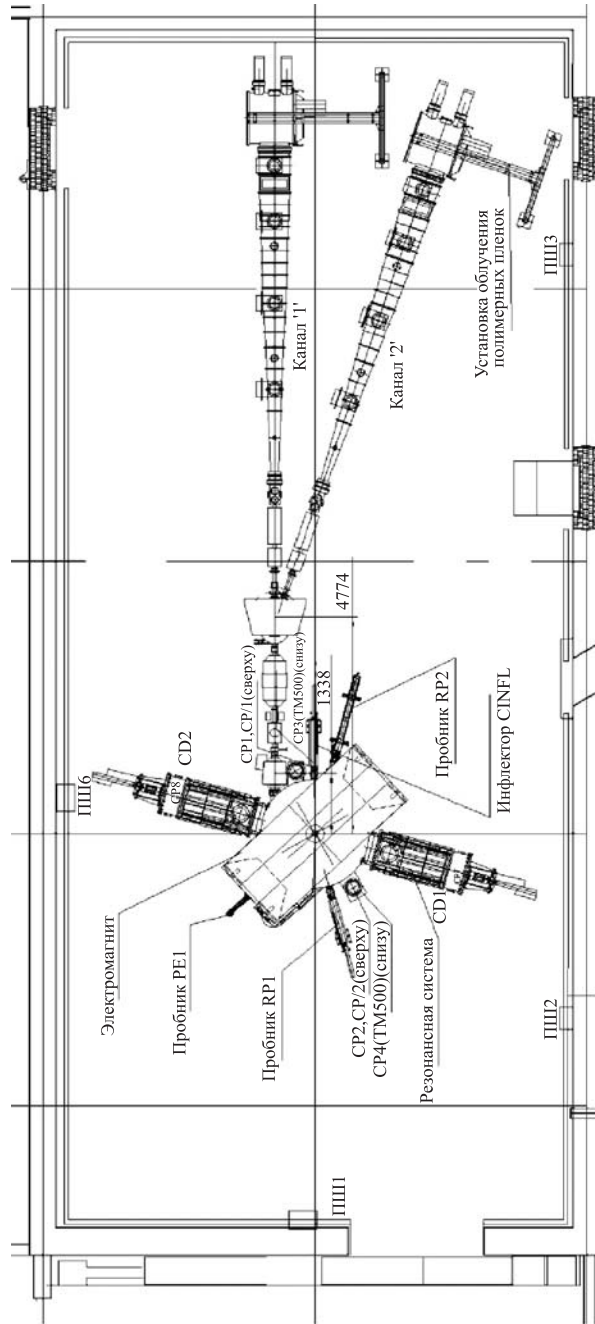


Рис. 8. Схема расположения циклотрона ДЦ-10 с каналами для облучения полимерной пленки

пленок. Каналы облучения оборудованы вертикальной и горизонтальной системами сканирования ускоренного пучка. Сканирование обеспечивает облучение стационарной мишени размерами 600×200 мм с однородностью распределения частиц по облучаемой площади не хуже $\pm 5\%$, краевые потери пучка могут составлять до 30–50 % в зависимости от режима настройки. Скорость движения пленки — от 0,05 до 1 м/с. Основной газовой нагрузкой для вакуумной системы канала являются пары воды с поверхности полимерной пленки. В канале применена распределенная схема расположения турбомолекулярных насосов вдоль ионопровода, кроме того, в установке для облучения пленки устанавливается криогенный насос фирмы POLYCOLD для откачки паров воды. При такой системе откачки вакуум в рабочем режиме в камере облучения пленки составляет 10^{-3} – 10^{-4} Торр, а на участке соединения с камерой ускорителя — 10^{-6} Торр. При этом потери пучка из-за перезарядки на остаточном газе в канале не превышают 5 %. Схема расположения циклотрона ДЦ-110 и каналов транспортировки пучка с установками для облучения полимерной пленки представлена на рис. 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ЛЯР ОИЯИ разработан проект циклотронного комплекса, предназначенного для проведения широкого спектра прикладных исследований в области нанотехнологий (трековые мембраны, модификация поверхности и др.). Циклотрон ДЦ-110 позволяет получать интенсивные пучки ускоренных ионов Ag, Kг и Хе с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон, необходимой для производства трековых мембран на основе полимерных пленок толщиной до 30 мкм. Циклотрон оборудован системой внешней инжекции с источником ионов ЭЦР-типа, работающим на частоте 18 ГГц. Электромагнит циклотрона с диаметром полюса 2 м обеспечивает среднее магнитное поле в рабочем зазоре на уровне 1,67 Тл. Фиксированная частота ВЧ-системы равна 15,5 МГц. Вывод пучка из циклотрона осуществляется электростатическим дефлектором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гикал Б. Н. и др. Ускорительный комплекс ИЦ-100 для проведения научно-прикладных исследований // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т. 5, № 1(143). С. 59–85.
2. Gulbekian G. et al. The Method of the Magnetic Field Formation in Cyclotron DC-72 // Nukleonika. 2003. V. 48, № 4. P. 207–210.
3. Гикал Б. Н. и др. Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий // АЭ. 2007. Т. 103, № 6. С. 357–364.
4. Gordon M. M. Calculation of Isochronous Fields for Sector-Focused Cyclotrons // Particle Accelerators. 1983. V. 13. P. 67–84.

Получено 24 июля 2009 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 09.10.2009.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 0,97. Тираж 290 экз. Заказ № 56735.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/