

**РАЗРАБОТКА, СОЗДАНИЕ И ЗАПУСК  
ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЦ-110  
ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА  
ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН**

*Б. Н. Гикал<sup>a</sup>, С. Н. Дмитриев<sup>a</sup>, Г. Г. Гульбекян<sup>a</sup>,  
П. Ю. Апель<sup>a</sup>, С. Л. Богомолов<sup>a</sup>, О. Н. Борисов<sup>a</sup>,  
В. А. Бузмаков<sup>a</sup>, В. А. Веревошкин<sup>a</sup>, А. А. Ефремов<sup>a</sup>,  
И. А. Иваненко<sup>a</sup>, Г. Н. Иванов<sup>a</sup>, Н. Ю. Казаринов<sup>a</sup>,  
В. И. Казача<sup>a</sup>, И. В. Калагин<sup>a</sup>, И. В. Колесов<sup>a</sup>,  
В. М. Кононов<sup>b</sup>, А. А. Королев<sup>b</sup>, В. А. Костырев<sup>a</sup>,  
А. М. Ломовцев<sup>a</sup>, В. Н. Мельников<sup>a</sup>, В. И. Миронов<sup>a</sup>,  
С. В. Пащенко<sup>a</sup>, В. А. Соколов<sup>a</sup>, Н. Ф. Осипов<sup>a</sup>,  
А. В. Тихомиров<sup>a</sup>, А. А. Фатеев<sup>a</sup>, М. В. Хабаров<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>b</sup> ЗАО «Трекпор Технолоджи», Москва

В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ разработан и создан циклотрон тяжелых ионов ДЦ-110 для промышленного производства трековых мембран.

Циклотрон оснащен источником ионов электронно-циклотронного резонанса, работающим на частоте 18 ГГц. В 2012 г. ускорительный комплекс введен в эксплуатацию, получены пучки ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$ ,  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  с энергией 2,5 МэВ/нуклон и интенсивностью 13, 14,5 и 10,5 мкА соответственно. На специализированном канале проведено облучение полимерной пленки, получены трековые мембраны с высокой однородностью пор. Ускорительный комплекс ДЦ-110 способен производить до 2 млн м<sup>2</sup> трековых мембран в год.

The cyclotron of heavy ions DC-110 for industrial production of track membranes has been developed and created at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

The cyclotron is equipped with an electron-cyclotron resonance ion source, working at 18 GHz frequency. In 2012 the accelerating complex was put into operation, beams of  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$ ,  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  ions of 2.5 MeV/nucleon energy and intensity of 13, 14.5 and 10.5  $\mu\text{A}$  accordingly have been obtained. On the specialized channel, irradiation of a polymeric film has been carried out, track membranes with high uniformity pores have been obtained. DC-110 accelerating complex is capable of making up to 2 million square meters of track membranes per year.

PACS: 29.20.dg; 29.38.-c

## ВВЕДЕНИЕ

Важной составляющей в широкой области развития нанотехнологий является использование пучков тяжелых ионов для создания модифицированных структур твердых тел. Одним из направлений применения ядерных технологий за последнее время стало получение трековых мембран с помощью ускорителей тяжелых ионов. Эта технология стала основой для многих технологических процессов, разработанных для промышленного применения.

Первое производство трековых мембран («ядерных фильтров») с использованием ускоренных тяжелых ионов было реализовано в середине 1970-х гг. на циклотроне У-300 ЛЯР ОИЯИ [1]. В дальнейшем исследования по модификации материалов тяжелыми ионами (в том числе и производство трековых мембран) получили широкое развитие в крупнейших ядерно-физических центрах США, Франции, Германии, Японии и других стран [2–4]. Однако большинство работ в этой области выполнено на мощных высокоэнергетических ускорителях, нацеленных прежде всего на выполнение широкого спектра фундаментальных научных исследований. Использование таких ускорителей для прикладных задач сопряжено, с одной стороны, с очень высокой стоимостью процесса облучения и, с другой стороны, существенными трудностями в обеспечении быстро меняющихся запросов партнеров, представляющих современную инновационную среду. В настоящее время особенно актуальна задача разработки специализированных ускорителей тяжелых ионов, позволяющих оптимально решать задачу создания и внедрения наукоемких технологий и прямого применения ускорителей в технологическом процессе.

В 1980-е гг. началось активное развитие источников электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), которое существенным образом изменило концепцию построения компактных циклотронов тяжелых ионов. Система внешней инжекции пучка из ЭЦР-источника позволила значительно расширить диапазон ускоряемых ионов в сторону более тяжелых масс, уменьшить размеры и энергопотребление циклотронов.

Первая система аксиальной инжекции пучка в России и странах-участницах ОИЯИ была создана на циклотроне У-200 (ЛЯР) в 1985–1986 гг. Были ускорены ионы гелия и углерода. В 1995–1996 гг. были установлены и запущены системы аксиальной инжекции пучка из ЭЦР-источников на исследовательских циклотронах ЛЯР У-400 и У-400М.

Первый специализированный циклотрон ИЦ-100 для прикладных работ на пучках тяжелых ионов был создан по инициативе Г. Н. Флерова в 1985 г. [5]. На нем использовался внутренний источник типа PIG. В 2001 г. была проведена кардинальная реконструкция циклотрона, был установлен источник электронно-циклотронного резонанса со сверхпроводящей магнитной структурой и создана система аксиальной инжекции пучка [6]. Достигнутые при этом параметры в полной мере показали преимущества новой концепции построения циклотронов. Диапазон ускоряемых ионов по массам до реконструкции (при использовании внутреннего источника ионов) составлял С–Аг, после реконструкции были получены пучки ионов Ne, Ar, Fe, Kr, I, Xe, W [7]. В настоящее время циклотрон обеспечивает выполнение широкого спектра прикладных задач, включающего исследование радиационной стойкости материалов, получение и изучение наноструктурированных композиционных материалов, а также нано- и микропористых мембран [8–10].

В 2004–2006 гг. в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ создан специализированный ускорительный комплекс ДЦ-60 для проведения научно-прикладных исследований и коммерческого производства трековых мембран. Комплекс был спроектирован и по-

строен для междисциплинарного научно-исследовательского Центра при Евразийском национальном университете им. Л. Н. Гумилева (Астана, Казахстан) [11, 12]. Учебные научно-производственные комплексы университет–технопарк сочетают в себе традиционный образовательный процесс и предпринимательство, научные исследования и инновационную деятельность. Это является наиболее эффективным путем интеграции высшего образования с наукой и передовыми технологиями.

Циклотрон ДЦ-60 уже несколько лет успешно обеспечивает выполнение программы прикладных и научных исследований на пучках ускоренных ионов в широком диапазоне изменения масс от Li до Xe и энергий 0,35–1,77 МэВ/нуклон, а также экспериментов на канале низких энергий на пучках тяжелых ионов, получаемых из ЭЦР-источника с напряжением экстракции до 25 кВ. Трековые мембраны, произведенные на пучках циклотрона ДЦ-60, отвечают самым высоким мировым стандартам.

Развиваемое в ЛЯР направление по созданию специализированных ускорителей (ИЦ-100, ДЦ-60) получило свое продолжение в проекте нового циклотрона ДЦ-110 [13], разработанного для научно-промышленного комплекса БЭТА, предназначенного для крупномасштабного производства плазмаферезаторов крови на основе трековых мембран [14]. Целью настоящей работы была разработка и создание современного ускорительного комплекса, обеспечивающего промышленное производство трековых мембран до 2 млн м<sup>2</sup> в год. Особенностью данного проекта явилась нацеленность на получение мембран для так называемого каскадного плазмафереза, требующего применения мембран с порами нанометрового диапазона, что, в свою очередь, требует высокой плотности пор и, соответственно, высокой интенсивности пучков.

В основу проекта ДЦ-110 легли научные и инженерные решения, разработанные в ходе эксплуатации циклотронов У-400, У-400М, ИЦ-100, ДЦ-60, а также новые разработки, значительно расширяющие возможности циклотрона для прикладных задач, к которым нужно отнести не только параметры пучков, но и высокую надежность и простоту обслуживания [15].

Проект специализированного циклотронного комплекса ДЦ-110 для промышленного производства трековых мембран включал в себя создание специализированного компактного циклотрона тяжелых ионов, инжектора многозарядных ионов на базе ионного источника типа ЭЦР и всех инженерных систем, обеспечивающих весь цикл облучения полимерной пленки — первой стадии технологии изготовления трековых мембран.

Ускорительный комплекс обеспечивает получение интенсивных пучков ионов Ar, Kr и Xe с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон, что позволяет производить трековые мембраны на основе полимерных пленок толщиной до 30 мкм.

В состав ускорительного комплекса входят:

- циклотрон ДЦ-110;
- ЭЦР-источник ионов и система аксиальной инжекции пучка;
- канал транспортировки ускоренного пучка, оснащенный установкой и технологическим оборудованием для облучения полимерной пленки;
- вакуумная система;
- система электропитания и управления;
- система охлаждения.

На циклотроне ДЦ-110 не предусматривается вариация энергии ионов и изменение отношения массы к заряду ускоряемых частиц. Такая концепция обеспечивает повышенную надежность и простоту управления комплексом.

Ускоритель комплектуется одним каналом облучения полимерной пленки. Предусмотрена возможность установки коммутирующего магнита и монтажа второго канала для увеличения производительности оборудования за счет одновременного проведения облучения пленки на одном канале и подготовки установки на другом.

Для получения пучков ионов с энергией 2,5 МэВ/нуклон выбран магнит циклотрона с диаметром полюса 2 м. В качестве ускоряемых ионов приняты  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$ , которые имеют близкие отношения массы к заряду 6,667, 6,615 и 6,600, что позволяет реализовать режим ускорения практически на фиксированной частоте ускоряющей системы и фиксированном магнитном поле с подстройкой  $B_0$  или  $F_{\text{ВЧ}}$  в небольшом диапазоне. Рассматривались два режима ускорения ионов на второй и четвертой гармониках частоты обращения ионов. Из анализа динамики движения пучка выбран вариант высокочастотной системы, работающей на второй гармонике, поскольку эффективность работы системы банчеров в этом случае лучше.

На циклотроне ДЦ-110 для получения необходимой интенсивности пучков  $^{84}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  используется источник ионов электронно-циклотронного резонанса, работающий на частоте 18 ГГц в «теплом» варианте магнитной системы с медными обмотками.

Весь цикл работ по созданию ускорительного комплекса (разработка проекта, создание и тестирование систем, монтаж и запуск) был реализован в течение трех лет. Ускоритель комплектуется одним каналом облучения полимерной пленки.

## 1. ИСТОЧНИК ИОНОВ

Ионный источник DECRIS-5 на частоту 18 ГГц разработан на базе созданных в ЛЯР ОИЯИ источников серии DECRIS-4 (14 ГГц) с медными обмотками [16] путем усиления магнитной структуры и перехода на новый тип СВЧ-генератора. Источник ионов DECRIS-5, созданный для промышленного применения, имеет повышенную надежность.

Номинальная интенсивность пучков ионов аргона, криптона и ксенона, которая требуется для ускорения на циклотроне ДЦ-110, приведена в табл. 1.

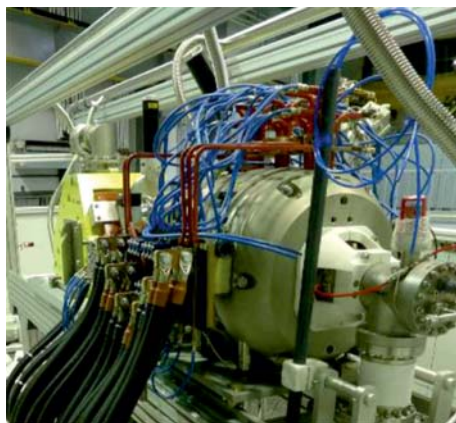


Рис. 1. Ионный источник DECRIS-5 на циклотроне ДЦ-110

Таблица 1. Параметры пучков ЭЦР-источника (18 ГГц) циклотрона ДЦ-110 в режиме промышленного облучения

Ион	$A/Z$	Необходимая интенсивность пучка, мкА
$^{40}\text{Ar}^{6+}$	6,667	85
$^{86}\text{Kr}^{13+}$	6,615	150
$^{132}\text{Xe}^{20+}$	6,600	150

Основные параметры источника DECRIS-5 перечислены в табл. 2.

После монтажа ЭЦР-источника и системы аксиальной инжекции (рис. 1) была проведена комплексная наладка всех систем источника и канала аксиальной инжекции.

Таблица 2. Основные параметры источника DECRIS-5

Частота СВЧ, ГГц	18
Мощность СВЧ-генератора, Вт	$\leq 2000$
Количество обмоток магнитной системы аксиального поля	3
Магнитное поле со стороны инжекции, Тл	2,2
Магнитное поле со стороны экстракции, Тл	1,35
Радиальное магнитное поле, Тл	1,15
Структура гексаполя (NdFeB), секторы	36
Внутренний диаметр плазменной камеры, мм	80
Длина плазменной камеры, мм	300
Максимальное напряжение экстракции, кВ	25
Рабочее напряжение экстракции, кВ	20
Максимальное потребление мощности, кВт	160

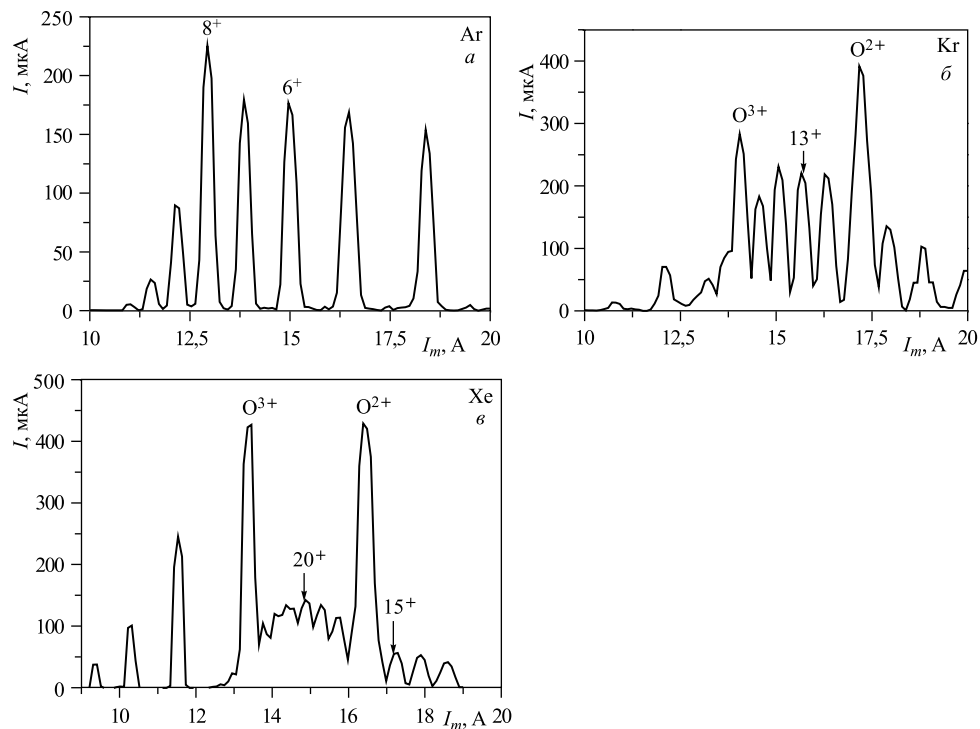


Рис. 2. Спектр ионов Ar (а), Kr (б) и Xe (в), полученный из ионного источника DECRIS-5 циклотрона ДЦ-110.  $I$  — ток пучка ионов;  $I_m$  — ток обмотки анализирующего магнита

Таблица 3. Максимальные интенсивности пучков ионов, полученные из источника DECRIS-5 (в мкА) ( $Z$  — заряд ионов)

Пучок ионов	$Z$						
	8+	9+	11+	15+	18+	19+	20+
Ag	1200	750	300				
Kr				325	182	120	70
Xe							220

Вакуумная система обеспечивала уровень вакуума  $2 \cdot 10^{-8}$  Торр в блоке экстракции и в диагностическом блоке.

Из источника были получены пучки ионов Ag, Kr и Xe. На рис. 2, *a–в* показаны спектры ионов после анализирующего магнита.

Исследована возможность получения максимальной интенсивности пучков ионов Ag, Kr, Xe, результаты приведены в табл. 3.

## 2. СИСТЕМА АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА

Для транспортирования пучка ионов ЭЦР-источника в центр циклотрона используется система аксиальной инжекции пучка (рис. 3), в состав которой входят:

- фокусирующие элементы IS1, IS2, IS3;
- корректирующие элементы ICM1, ICM2;
- анализирующий магнит IM90;
- диагностические элементы для измерения параметров инжектируемого пучка;
- линейный банчер, расположенный в 2450 мм от медианной плоскости (IBN1);
- синусоидальный банчер, расположенный в 800 мм от медианной плоскости (IBN2);
- вакуумные средства откачки на базе турбомолекулярных насосов и криогенных насосов;
- электростатический инфлектор, расположенный в центре циклотрона для поворота инжектируемого пучка из вертикального канала в медианную плоскость циклотрона.

Напряжение инжекции 20 кВ выбрано исходя из оптимальных условий динамики движения пучка в центре циклотрона. Параметры элементов аксиальной инжекции пучка указаны в табл. 4.

Таблица 4. Параметры элементов аксиальной инжекции пучка

Обозначение	Тип элемента	Максимальное поле, кГс	Расчетная рабочая амплитуда напряжения, В
IS1	Соленоид	6	
IM90	Анализирующий магнит	1,9	
IS2	Соленоид	2	
IS3	Соленоид	5	
IBL	Линейный банчер (2450 мм от медианной плоскости)		700–750
IBS	Синусоидальный банчер (800 мм от медианной плоскости)		300–350

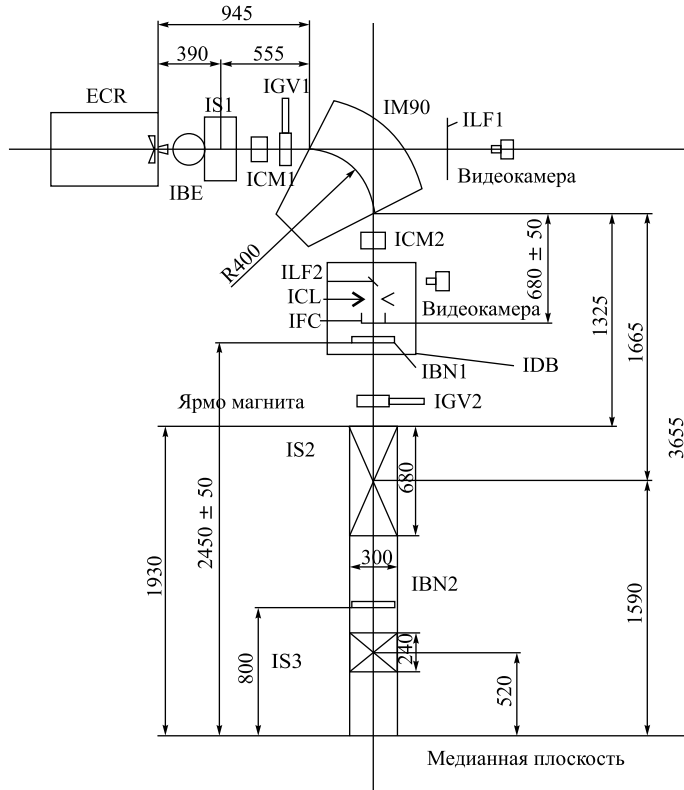


Рис. 3. Схема системы аксиальной инжекции пучка циклотрона ДЦ-110

### 3. МАГНИТ ЦИКЛОТРОНА

Магнитная структура ДЦ-110 создана на базе электромагнита с диаметром полюса 2 м.

В циклотроне ДЦ-110 не предусматривается использование радиальных корректирующих катушек, магнитное поле сформировано с помощью железных масс. Для коррекции первой гармоники в долинах циклотрона установлены две сборки азимутальных корректирующих катушек.

В рабочем зазоре магнита размещены четыре пары секторов с прямыми границами, закрепленные на полюсе магнита. Каждый сектор оснащен боковыми съемными шиммами. Азимутальная или вертикальная обработка боковых секторных шимм использовалась для коррекции магнитного поля при формировании изохронных условий ускорения, а также для компенсации влияния магнитного канала, используемого для фокусировки пучка в системе вывода пучка из цикло-

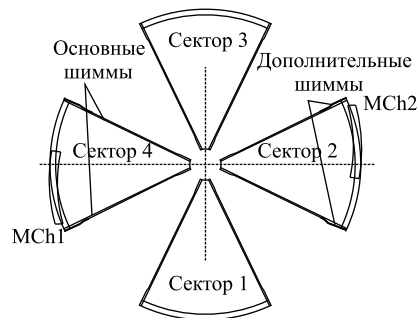


Рис. 4. Схема расположения основного фокусирующего (Mch1) и компенсирующего (Mch2) каналов

Таблица 5. Основные параметры электромагнита циклотрона ДЦ-110

Размер магнитопровода, Д×Ш×В, мм	4940 × 2075 × 2840
Диаметр полюса, мм	2000
Межполюсный зазор, мм	218
Количество пар секторов	4
Угловая протяженность сектора (спиральность), град	52 (0)
Высота сектора, мм	65,5
Зазор между секторами, мм	42
Зазор между сектором и полюсом, мм	24,5
Зазор между центральными пробками, мм	112
Количество радиальных корректирующих катушек	0
Количество сборок азимутальных корректирующих катушек	2
Масса электромагнита, т	250
Магнитное поле в центре, Тл	1,67
Флаттер	0,117
Частота бетатронных колебаний	
$\nu_r$	0,34
$\nu_z$	1,015

трона. Для подавления нечетных гармоник магнитного поля в циклотроне центрально симметрично фокусирующему магнитному каналу установлен компенсирующий канал, по конструкции идентичный основному (рис. 4). Его влияние на магнитное поле циклотрона также учтено. Основные параметры электромагнита циклотрона ДЦ-110 приведены в табл. 5.

#### 4. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА ЦИКЛОТРОНА

В изохронном циклотроне ДЦ-110 для получения ускоряющего напряжения на дуантах применяется резонансная система, содержащая следующие узлы:

— два диаметрально противоположно расположенных четвертьволновых коаксиальных резонатора — баки из нержавеющей стали, плакированные внутри бескислородной медью,

— два медных дуанта угловой протяженностью  $40^\circ$ ,

— две сборки антидуантов, расположенных в долинах циклотрона.

Резонаторы циклотрона укомплектованы узлами ввода мощности и подстройки частоты, это

— петля связи для ввода высокочастотной мощности в резонатор,

— механизм ручного перемещения закорачивающей пластины,

— триммер автоматической подстройки резонансной частоты,

— юстировочный механизм,

— пикап-электроды для измерения напряжения на дуантах.



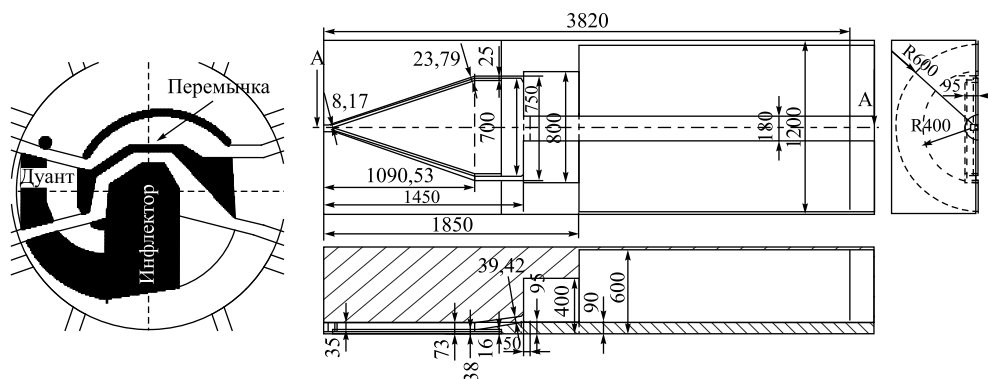


Рис. 5. Схема высокочастотного резонатора ДЦ-110 и центральной области циклотрона

Таблица 6. Общие характеристики ВЧ-системы

Резонансная частота резонаторов в холодном режиме, МГц	7,494–7,806
Гармоника ускорения	2
Номинальное положение закорачивающей пластины от центра циклотрона, мм	3760
Напряжение на дуанте, кВ	55
Расчетная ВЧ-мощность возбуждения одного резонатора, кВт	4,3
Максимальная плотность тока на штоке, А/см	32
Диапазон подстройки частоты триммером АПЧ, кГц	100 (0,13 %)
Максимальная мощность ВЧ-генератора, кВт	20

Схема резонатора ДЦ-110 приведена на рис. 5. Основные характеристики высокочастотной системы показаны в табл. 6.

## 5. ВЫВОД ПУЧКА

Оптимальным решением для вывода пучка тяжелых ионов из циклотрона ДЦ-110 является электростатическая система на базе дефлектора с напряженностью электрического поля 50–60 кВ/см.

Таблица 7. Параметры электростатического дефлектора

Напряжение на потенциальной пластине, кВ	50–60
Длина потенциальной пластины, мм	500
Длина септумной пластины, мм	550
Толщина септумной пластины, мм	0,3
Радиус кривизны пластин	В соответствии с расчетом
Высота пластин, мм	50
Зазор между пластинами, мм	10
Перемещение входа и выхода дефлектора, мм	±15
Точность установки дефлектора, мм	±1

Электростатический дефлектор циклотрона представляет собой две пластины с заданной кривизной поверхностью (септумная и потенциальная), между пластинами создается электрическое поле, отклоняющее пучок. Дефлектор располагается в долине. Расстояние между пластинами 10 мм. Септум и потенциальная пластина охлаждаются водой.

Основные параметры дефлектора приведены в табл. 7. Вход и выход дефлектора имеют возможность перемещения для согласования выводной траектории с геометрией дефлектора.

Для фокусировки пучка в процессе вывода в камере циклотрона используется пассивный магнитный канал.

Для согласования положения канала и выводной траектории существует возможность радиального перемещения входа и выхода канала на  $\pm 15$  мм от номинального положения, точность позиционирования  $\pm 1$  мм.

## 6. КАНАЛЫ ПУЧКОВ ДЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Циклотронный комплекс ДЦ-110 комплектуется одним каналом для транспортировки пучков ускоренных ионов (рис. 6, а) с возможностью установки коммутирующего магнита и монтажа второго канала. Элементы канала обеспечивают равномерное облучение тяжелыми ионами поверхности движущейся пленки шириной до 600 мм.

В состав канала транспортировки пучка входят:

- начальный участок ионопровода;
- специализированный канал, укомплектованный соответствующим оборудованием для облучения полимерных пленок;
- установка для облучения полимерных пленок.

Ионопровод состоит из начального участка с апертурой  $\varnothing 100$  мм и ионопровода специализированного канала, выполненного в виде расширяющегося до размера  $300 \times 700$  мм конуса.

Ионно-оптическая система канала облучения полимерных материалов состоит из трех квадрупольных линз, трех корректирующих магнитов и системы сканирования пучков.

Горизонтальная система сканирования пучков тяжелых ионов создана на базе магнита, питающегося пилообразным током, вертикальное сканирование осуществляется электростатическим дефлектором с пилообразным напряжением.

Мишень в канале облучения полимерных материалов находится на расстоянии около 10 м от системы сканирования, размер максимальной области облучения в позиции мишени составляет  $300 \times 700$  мм.

Расчетный размер пучка ионов на мишени при выключенной системе сканирования составляет около  $\varnothing 80$  мм.

Рабочие частоты генераторов развертки:

- горизонтальная частота сканирования с использованием магнита  $f_x \approx 100$  Гц,
- вертикальная частота сканирования с использованием электростатики  $f_y \approx 2000$  Гц.

Управление амплитудой сканирования, блокировкой системы сканирования и контроль параметров осуществляется с пульта управления ускорителем.

Для контроля параметров пучка в блоках диагностики установлены цилиндры Фарадея и профилометры, измеряющие интенсивность выведенного пучка ионов и пространственное положение пучка в сечении ионопровода.



Рис. 6. Канал транспортировки пучка (а) и установка для облучения полимерной пленки (б)

Канал циклотрона ДЦ-110 комплектуется специализированной установкой (рис. 6, б), предназначенной для облучения тяжелыми ионами полимерной пленки, перемещающейся в зоне облучения со скоростью от 0,05 до 1,0 м/с. Полимерные пленки могут быть полиэтилентерефталатными, поликарбонатными, полиимидными или сделанными из других аналогичных по механическим свойствам пленочных материалов, имеющих модуль упругости 2–5 ГПа и прочность на разрыв не ниже 100 МПа. Плотность полимеров находится в пределах от 900 до 1500 кг/м<sup>3</sup>. Ширина и толщина пленок могут варьироваться в пределах от 200 до 600 мм и от 10 до 30 мкм соответственно.

Установка для облучения полимерной пленки комплектуется секцией диагностики ионного пучка для контроля интенсивности и пространственного распределения ионного пучка по сечению ионопровода в процессе облучения. Система сканирования обеспечивает:

- облучение стационарной мишени размерами 600 × 200 мм с однородностью распределения частиц по облучаемой площади не хуже ±10 %;
- облучение движущейся пленки шириной до 600 мм со скоростью от 0,05 до 1 м/с. Однородность распределения частиц в зоне облучения не хуже ±10 %.

## 7. ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Требования к вакуумной системе определяются главным образом потерями ионов из-за перезарядки на остаточном газе.

Вакуумная система циклотронного комплекса состоит из:

- системы откачки камеры циклотрона и двух высокочастотных резонаторов общим объемом ~ 3500 л; средства откачки: два криогенных и восемь турбомолекулярных насосов с суммарной скоростью откачки 13300 л/с;
- системы откачки канала аксиальной инжекции пучка и ионного источника (два криогенных и три турбомолекулярных насоса с суммарной скоростью откачки 2050 л/с);

Таблица 8. Проектный и полученный в циклотроне ДЦ-110 вакуум

Узел	Требуемый вакуум, Торр	Полученный вакуум, Торр
Канал инжекции	$1 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
Камера циклотрона	$(1-2) \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$ (в статическом режиме) $2,7 \cdot 10^{-7}$ (в рабочем режиме, с пучком)
Канал ионов высокой энергии	$5 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$ (в статическом режиме)

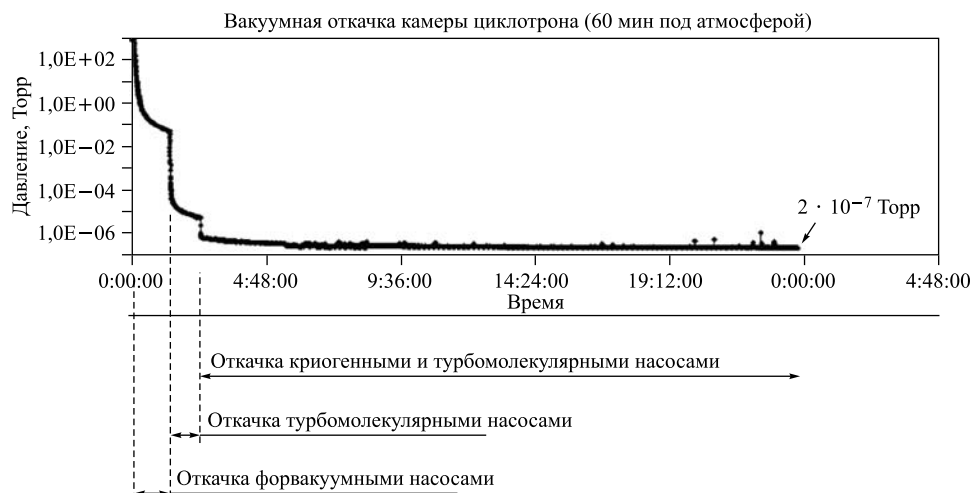


Рис. 7. Зависимость давления от времени при откачке вакуумной камеры циклотрона от атмосферы до рабочего вакуума

— системы откачки канала транспортировки пучка: восемь турбомолекулярных насосов с суммарной скоростью откачки 3650 л/с;

— системы откачки установки облучения пленки — три турбомолекулярных насоса с суммарной скоростью откачки 1500 л/с и две криогенные панели Policold с суммарной скоростью откачки 70 000 л/с по водяным парам.

В табл. 8 показан проектный и полученный в циклотроне ДЦ-110 в ходе пусконаладочных работ вакуум. График выхода на рабочий вакуум в камере циклотрона приведен на рис. 7.

## 8. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЦИКЛОТРОНА И УСКОРЕННЫЕ ИОНЫ

На начальном этапе пусконаладочных работ были изучены резонансные характеристики для того, чтобы найти оптимальный уровень магнитного поля, при котором фазовые потери при ускорении пучка ионов минимальны.

Исследования были проведены на разных частотах ускоряющей системы. В оптимальном режиме резонансные кривые симметричны друг относительно друга. На рис. 8

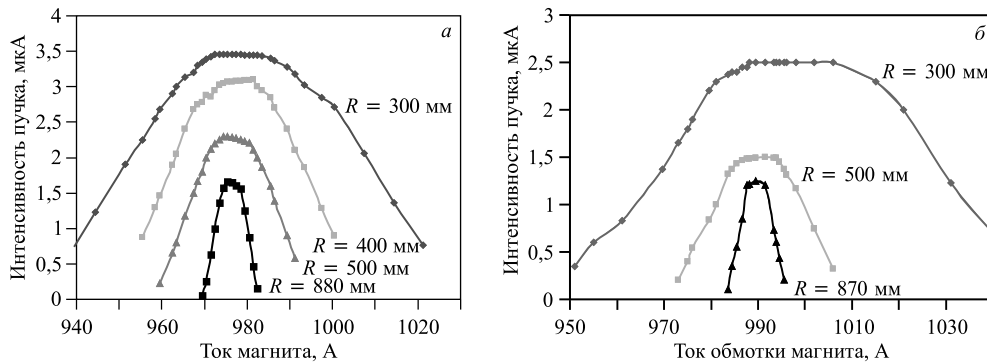


Рис. 8. Резонансные зависимости интенсивности ускоренного пучка ионов  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  на разных радиусах при изменении магнитного поля в оптимальном режиме при  $F_{\text{ВЧ}} = 7,730$  МГц (а) и при увеличении частоты на 18 кГц (б)

показана зависимость интенсивности ускоренного пучка ионов  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  на разных радиусах при изменении магнитного поля в оптимальном режиме ускорения.

Изменение частоты на 18 кГц и соответственно резонансного уровня магнитного поля приводит к несимметричному положению резонансных кривых друг относительно друга. В принципе, это не приводит к потере интенсивности на конечном радиусе. Тем не менее для ускорения ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$ , которые имеют небольшое отличие в отношении массы к заряду (6,667, 6,615 и 6,600), было принято решение использовать режим ускорения при фиксированном магнитном поле, для чего частота ускоряющей системы должна изменяться в соответствии с табл. 9.

Таблица 9. Оптимальные значения частоты ВЧ-системы и магнитного поля при ускорении ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$

Ион	$A/Z$	Магнитное поле, Тл	Оптимальная частота ВЧ-системы $F_{\text{ВЧ}}$ , МГц	Отличие частоты $\Delta F$ , кГц
$^{40}\text{Ar}^{6+}$	6,6667	1,6612	7,653	23
$^{86}\text{Kr}^{13+}$	6,6154	1,6612	7,712	-18
$^{132}\text{Xe}^{20+}$	6,600	1,6612	7,730	0

Режим ускорения, указанный в табл. 9, не требует перестройки каких-либо параметров систем ускорителя при изменении типа ускоряемых ионов, за исключением подстройки частоты резонансной системы.

Для пучков ионов аргона, криптона и ксенона измерено падение интенсивности пучка с увеличением радиуса ускорения ( $R$ ) в циклотроне (рис. 9). Падение интенсивности пучка при  $R$  больше 890 мм связано с частичным выводом пучка и потерями на септуме дефлектора.

Были измерены зависимости интенсивности пучков на конечном радиусе циклотрона от давления в камере ускорителя (рис. 10). Из анализа данных установлено, что потери пучка при ускорении из-за перезарядки на остаточном газе при давлении  $\sim 2 \cdot 10^{-7}$  Торр составляют для  $^{40}\text{Ar}^{6+}$  18%, для  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  27%, для  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  44%. Фазовые и апертурные потери оцениваются на уровне 10%.

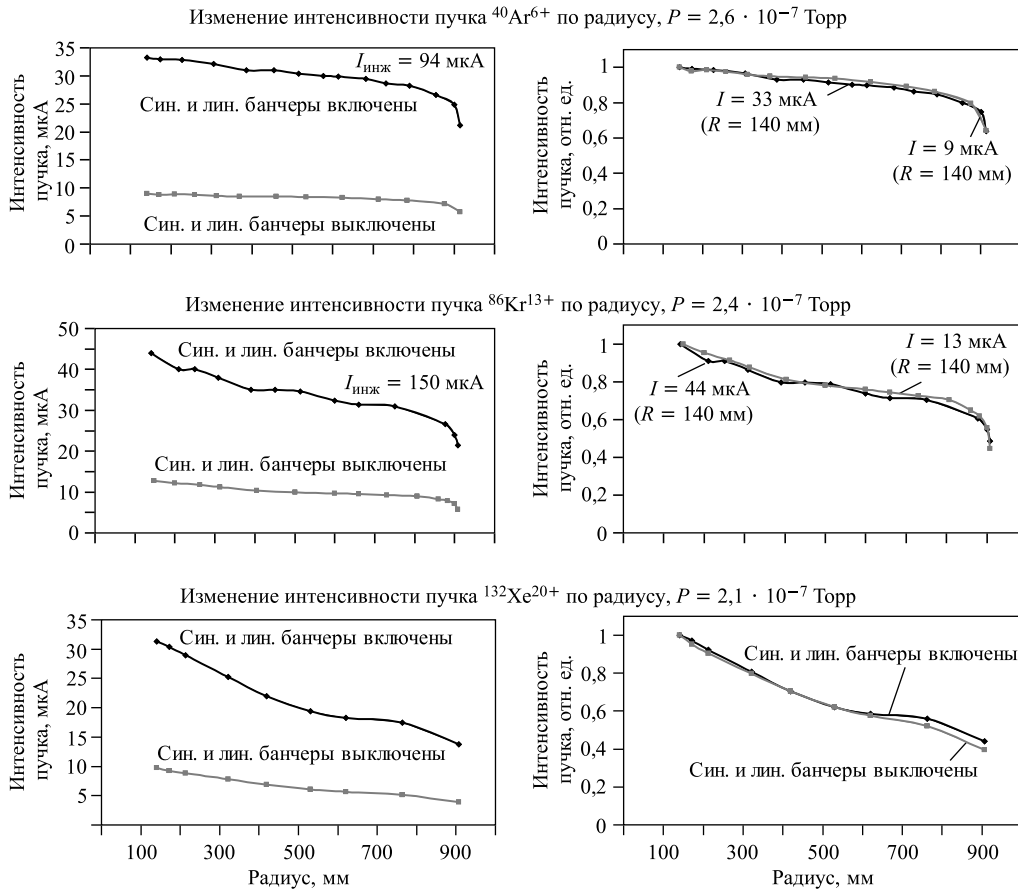


Рис. 9. Зависимость интенсивности пучков ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  от радиуса ускорения в абсолютных (мкА) и относительных единицах при ускорении в циклотроне ДЦ-110.  $P$  — давление в камере ускорителя, син. — синусоидальный, лин. — линейный

Фазовый аксептанс циклотрона ДЦ-110 составляет примерно  $30^\circ$ , для увеличения эффективности захвата в ускорение инжектируемого пучка используется система банчировки пучка. В системе аксиальной инжекции пучка циклотрона ДЦ-110 установлены два банчера — линейный, расположенный на расстоянии 2450 мм от медианной плоскости, и синусоидальный, расположенный на расстоянии 800 мм от медианной плоскости. Линейный банчер нельзя установить близко к медианной плоскости циклотрона из-за невозможности передачи пилообразного сигнала высокой амплитуды по кабелю. Однако при большом расстоянии банчера от медианной плоскости значительно снижается его эффективность при высокой интенсивности пучка из-за влияния пространственного заряда. В системе с двойной банчировкой линейный банчер предназначен для того, чтобы сгруппировать инжектируемые ионы в  $180^\circ$ -й интервал фаз в зоне расположения синусоидального банчера, который эффективно работает в таком диапазоне фаз.

Эффективность созданной системы банчировки была экспериментально изучена при разной интенсивности инжектируемого пучка. На рис. 11 представлена зависимость ин-

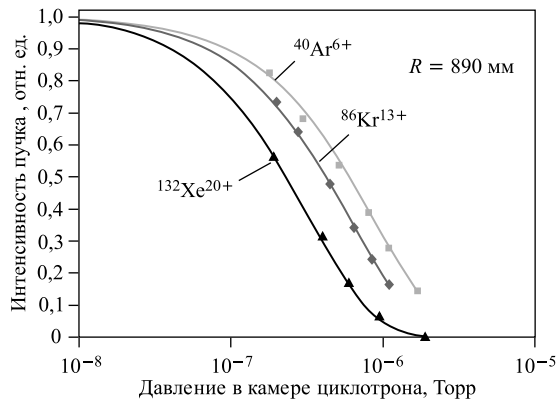


Рис. 10. Зависимость эффективности прохождения пучка ионов <sup>40</sup>Ar<sup>6+</sup>, <sup>86</sup>Kr<sup>13+</sup> и <sup>132</sup>Xe<sup>20+</sup> при ускорении от центра до конечного радиуса — 890 мм от давления в камере циклотрона ДЦ-110

тенсивности ускоренного пучка в центре циклотрона на радиусе 200 мм от интенсивности инжектируемого пучка в оптимальных режимах при разной комбинации включения банчеров. Эффективность захвата пучка в ускорение и коэффициент увеличения интенсивности пучка по сравнению с небанчирующим пучком представлены на рис. 11 и в табл. 10.

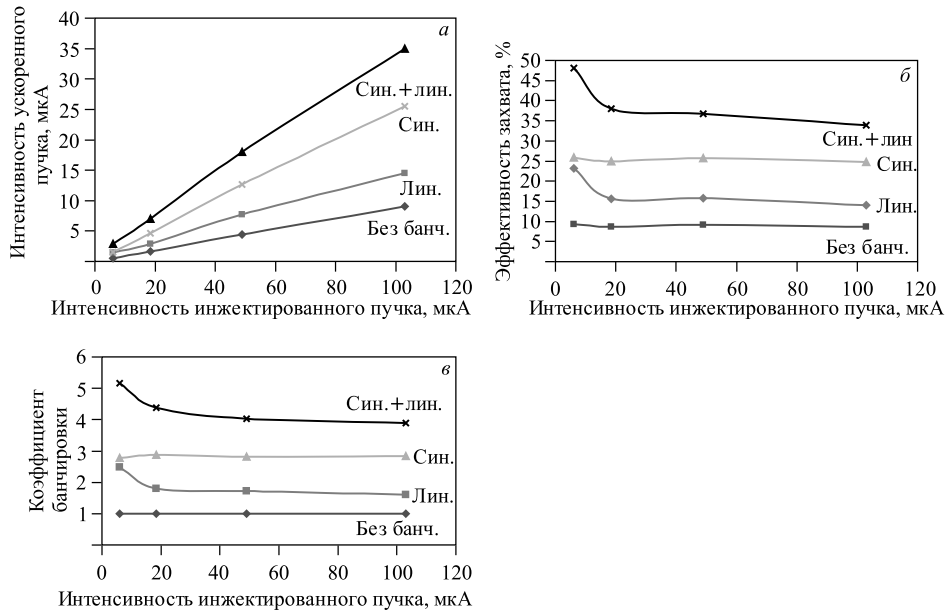


Рис. 11. Эффективность захвата пучка ионов в ускорение на радиусе 200 мм в зависимости от интенсивности инжектированного пучка при разной комбинации включения банчеров. а) Зависимость интенсивности ускоренного пучка на  $R = 200$  мм от интенсивности инжектированного пучка; б) эффективность захвата пучка в ускорение в зависимости от интенсивности инжектированного пучка; в) изменение коэффициента увеличения интенсивности ускоренного пучка при разной комбинации включения банчеров в зависимости от интенсивности инжектированного пучка (син. — синусоидальный банчер, лин. — линейный)

Таблица 10. Коэффициент захвата инжектированного пучка в ускорение при разной комбинации включения банчеров

$I_{\text{инж}}$ , мкА	Коэффициент захвата инжектированного пучка в ускорение, %			
	Без банчера	Линейный банчер включен	Синусоидальный банчер включен	Синусоидальный и линейный банчеры включены
6	9,3	23,2	25,8	48,2
18,4	8,7	15,6	25,0	38,0
49	9,1	15,7	25,7	36,7
103	8,7	14,1	24,8	34,0

Исследования показали, что эффективность системы банчировки слабо зависит от интенсивности инжектируемого пучка вплоть до 100 мкА (34–38 % захвата). Увеличение коэффициента захвата до 48 % при низкой интенсивности инжектированного пучка 6 мкА связано не только со снижением влияния пространственного заряда в пучке, но, главным образом, с уменьшением эмиттанса пучка при низкой интенсивности из ионного источника, поскольку снижение интенсивности осуществлялось за счет уменьшения СВЧ-мощности, подаваемой в разрядную камеру источника.

Основная настройка циклотрона ДЦ-110 с целью получения проектных параметров проводилась с использованием пучка ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$ . В ходе настройки ускорителя был найден режим с высоким коэффициентом трансмиссии пучка от ионного источника до установки облучения полимерной пленки при интенсивности инжектируемого пучка, близкой к максимальной — 150 мкА.

В оптимальном режиме работы циклотрона интенсивность ускоренного и выведенного пучка ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  составила 14,5 мкА, по проекту — 13 мкА.

Настройка проводилась по максимальному току пучка на цилиндре Фарадея, расположенном в первом блоке диагностики канала транспортировки выведенного пучка. Дальнейшая транспортировка пучка по каналу до установки облучения полимерной пленки была выполнена без потери интенсивности. При выключенной системе сканирования размер сфокусированного пучка в плоскости облучения пленки составил около 100 мм по горизонтали и 80 мм по вертикали. Сканирующие магниты обеспечили размах сканирования пучка для равномерного облучения пленки шириной 600 мм.

Настройка ускорителя проводилась в двух режимах: с выключенной и включенной системой банчировки пучка. В табл. 11 и 12 приведены коэффициенты трансмиссии пучка на каждом этапе от ионного источника до мишени.

Из ионного источника после сепарации в  $90^\circ$ -м магните в канале аксиальной инжекции был получен ток пучка ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  150 мкА. Без использования банчеров в процесс ускорения было захвачено 8,7 % инжектированного пучка. Центральная область циклотрона имеет фазовый акцептанс примерно  $30^\circ$ . Согласно расчету в случае пучка с постоянной плотностью по времени в ускорение должно захватываться около 8 % инжектированного пучка. Такой режим был экспериментально получен на циклотроне. Потери пучка в канале инжекции не оказали заметного влияния на эффективность захвата.

Использование синусоидального и пилообразного банчеров позволило сгруппировать ионы в области фазового захвата и увеличить интенсивность ускоренного пучка в центре ускорителя до 44 мкА, что составляет 29 % от инжектируемого пучка.



Таблица 11. Трансмиссия пучка  $^{84}\text{Kr}^{13+}$  от ионного источника до установки облечения пленки при выключенной системе банчирования

Ток инжектированного пучка, мкА	Ток ускоренного пучка, мкА (при выключенной системе банчирования пучка)		Ток пучка на входе в дефлектор, $R = 908$ мм	Ток выведенного пучка, мкА	Ток пучка на мишени, мкА
	$R = 140$ мм	$R = 890$ мм			
150	13	8,5	5,8	3,9	3,9
8,7 % (8 %)					
	64 %				
		70 %			
	45 % (75 %)				
			67 % (60 %)		
				100 % (90 %)	
2,6 % (3,2 %)					
<i>Примечание.</i> В скобках указаны проектные значения.					

Таблица 12. Трансмиссия пучка  $^{84}\text{Kr}^{13+}$  от ионного источника до установки облечения пленки при включенных синусоидальном и линейном банчерах

Ток инжектированного пучка, мкА	Ток ускоренного пучка, мкА (при включенной системе банчирования пучка)		Ток пучка на входе в дефлектор, $R = 908$ мм	Ток выведенного пучка, мкА	Ток пучка на мишени, мкА
	$R = 140$ мм	$R = 890$ мм			
150	44	27,7	20,7	14,5	14,5
29 % (30 %)					
	63 %				
		77 %			
	47 % (75 %)				
			70 % (60 %)		
				100 % (90 %)	
9,6 % (12 %)					
<i>Примечание.</i> В скобках указаны проектные значения.					

Измерены потери пучка в процессе ускорения от центра циклотрона до конечного радиуса ускорения. На рис. 9 показано изменение интенсивности ускоряемого пучка по радиусу циклотрона в абсолютных и относительных единицах в двух режимах: при выключенной системе банчирования и при включенных синусоидальном и линейном банчерах. В рабочем режиме давление в камере циклотрона составило  $2,4 \cdot 10^{-7}$  Торр (без пучка —  $1,7 \cdot 10^{-7}$  Торр). Потери ионов  $^{84}\text{Kr}^{13+}$  при ускорении от радиуса 140 мм до радиуса 890 мм составили около 37 % как в случае сгруппированного пучка, так и в случае выключенных банчеров. В процессе ускорения фазовые и апертурные потери оцениваются на уровне 10 %. Вакуумные потери составляют около 30 %. Снижение вакуумных потерь ожидается по мере улучшения вакуума в камере ускорителя за счет вакуумной тренировки внутренних поверхностей. Потери пучка на радиусах от 890 до 908 мм (перед входом в дефлектор) составляют 20–30 % и вызваны фазовыми потерями на конечных радиусах и потерями на септуме дефлектора. Эффективность транспортировки

пучка через элементы системы вывода (дефлектор и магнитный канал) составила около 70 %. Трансмиссия пучка от ионного источника до мишени получена около 3 % для пучка без системы банчирования и около 10 % с включенными банчерами (синусоидальным и линейным).

На базе экспериментальных результатов, полученных при оптимизации режима ускорения ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  на циклотроне ДЦ-110, были рассчитаны рабочие параметры для ускорения ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$ .

Из ионного источника после сепарации в канале аксиальной инжекции была получена интенсивность пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$  94 мкА. Интенсивность выведенного пучка составила 13 мкА, по проекту — 6 мкА.

Настройка проводилась по максимальному току пучка на цилиндре Фарадея в первом блоке диагностики канала транспортировки выведенного пучка.

Коэффициенты трансмиссии пучка  $^{40}\text{Ar}^{6+}$  на всех этапах инжекции, ускорения и вывода пучка из циклотрона при включенной системе банчировки приведены в табл. 13.

**Таблица 13. Трансмиссия пучка  $^{40}\text{Ar}^{6+}$  от ионного источника до установки облучения пленки при включенных банчерах (синусоидальном и линейном)**

Ток инжектируемого пучка, мкА	Ток ускоренного пучка, мкА (система банчировки пучка включена)		Ток выведенного пучка, мкА
	$R = 140$ мм	$R = 908$ мм	
94	33,3	20,4	13
35 %			
	61 %		
		64 %	
	35 %		
	14 %		

Из ионного источника был получен ток пучка ионов  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  — 195 мкА. Однако нужно отметить, что  $90^\circ$ -й анализирующий магнит в системе аксиальной инжекции пучка в режиме транспортировки (без использования коллиматоров) не имеет достаточного разрешения для полного разделения ионов Хе по зарядам, поэтому измеренная величина тока пучка ионов  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  в канале инжекции — 195 мкА не является корректной. Она имеет примеси соседних зарядов, которые увеличивают измеряемую величину на 20–30 % (рис. 2). Трансмиссия пучка от ионного источника до установки облучения пленки в оптимальном режиме при включенных банчерах (синусоидальном и линейном) показана в табл. 14.

Потери пучка  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  по радиусу в процессе ускорения от центра циклотрона до конечного радиуса составляют 56 %, из них примерно 45 % — вакуумные потери. В рабочем режиме (с пучком) давление в камере циклотрона составило  $2,1 \cdot 10^{-7}$  Торр. При выводе пучка ионов  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  из циклотрона получен режим с высоким коэффициентом трансмиссии через дефлектор и магнитный канал — 79 %.

В результате выполнения программы пусконаладочных работ ускорены ионы аргона, криптона и ксенона. Проектные и экспериментально полученные параметры пучков ионов приведены в табл. 15.

Таблица 14. Трансмиссия пучка  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  от ионного источника до установки облучения пленки при включенных синусоидальном и линейном банчерах

Ток инжектируемого пучка, мкА	Ток ускоренного пучка, мкА (система банчировки пучка включена)		Ток выведенного пучка, мкА
	$R = 140$ мм	$R = 908$ мм	
195* 150 (оценка)	31	13,8	10,9
16 %* 20 % (оценка)			
	44 %		
		79 %	
	35 %		

\* Примеси соседних зарядов увеличивают измеряемую величину тока инжекции  $^{132}\text{Xe}^{20+}$ .

Таблица 15. Параметры пучков ионов циклотрона ДЦ-110

Ион	Отношение массы к заряду	Интенсивность пучка из ЭЦР-источника, мкА	Интенсивность ускоренного и выведенного пучка, мкА		Энергия ионов, МэВ/нуклон
			Проект	Полученный результат	
$^{40}\text{Ar}^{6+}$	6,6667	94	6	13	2,5
$^{86}\text{Kr}^{13+}$	6,6154	150	13	14,5	2,5
$^{132}\text{Xe}^{20+}$	6,6	190	10	10,9	2,5

Для тестового облучения пленки был использован пучок ионов криптона. Размер выведенного пучка на входе в ионопровод соответствует расчетному —  $20 \times 25$  мм (верт./гориз.). Корректирующие магниты и квадрупольные линзы позволяют транспортировать пучок на установку облучения полимерной пленки без потери интенсивности.

Система сканирования [17] обеспечила однородное облучение пленки шириной 600 мм. Интенсивность пучка Кг после формирования непосредственно на пленке в про-

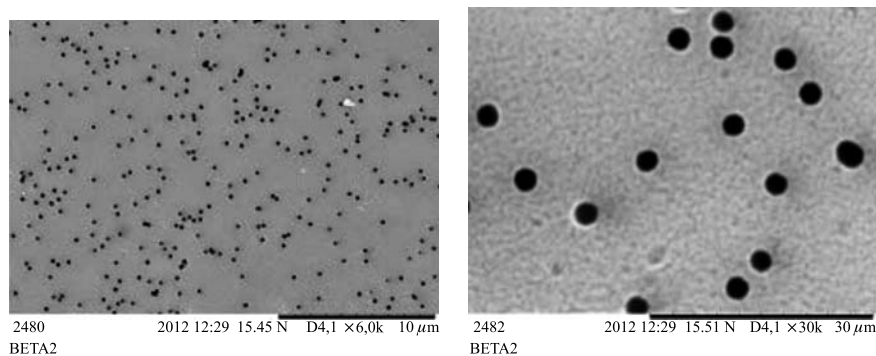


Рис. 12. Фотография трековой мембраны, сделанная на электронном микроскопе при разных увеличениях, пленка — полиэтилентерефталат толщиной 12 мкм, плотность пор —  $6,16 \cdot 10^7$  пор/см<sup>2</sup>

веденном эксперименте составила около 0,1 мкА, что позволило получить плотность  $1,32 \cdot 10^8$  пор/см<sup>2</sup> при скорости перемотки пленки 10 см/с и  $6,16 \cdot 10^7$  пор/см при скорости перемотки пленки 20 см/с. Неднородность облучения по ширине пленки получена лучше  $\pm 10\%$ , по длине — менее статистической погрешности. Фотографии образцов трековых мембран представлены на рис. 12.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы по созданию циклотронного комплекса ДЦ-110 были начаты в августе 2009 г. В 2012 г. выполнен монтаж и наладка оборудования циклотрона в здании научно-промышленного комплекса БЕТА, получены пучки ускоренных ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  с проектной энергией 2,5 МэВ/нуклон и проектной интенсивностью 13, 14,5 и 10,5 мкА соответственно.

Проведено тестовое облучение полимерной пленки ионами Кг. Достигнутая степень однородности плотности пор (лучше  $\pm 10\%$ ) удовлетворяет требованиям, предъявляемым к трековым мембранам нового поколения.

Ускорительный комплекс ДЦ-110 способен обеспечить производство 2 млн м<sup>2</sup> трековых мембран в год, что существенно превышает возможности известных ускорительных центров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Флеров Г. Н. Синтез сверхтяжелых элементов и применение методов ядерной физики в смежных областях // Вестн. АН СССР. 1984. №4. С. 35–48.
2. Fischer B. E., Spohr R. Production and Use of Nuclear Tracks: Imprinting Structure on Solids // Rev. Mod. Phys. 1983. V. 55. P. 907–948.
3. Bieth C. (the SAIF Group). Perspectives Applications of Tracks at GANIL // Nucl. Tracks Rad. Meas. 1991. V. 19. P. 875–880.
4. Choi B. K. et al. Long-Term Reliability Degradation of Ultrathin Dielectric Films due to Heavy-Ion Irradiation // Nucl. Sci. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 2003. V. 49, Issue 6. P. 3045–3050.
5. Флеров Г. Н. и др. Использование ускорителей тяжелых ионов для изготовления ядерных мембран // АЭ. 1989. Т. 67, №4. С. 274–280.
6. Гикал Б. Н. и др. Модернизация циклического имплантатора ИЦ-100. Препринт ОИЯИ Р9-2003-121. Дубна, 2003.
7. 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.
8. Apel P. Yu., Dmitriev S. N. Micro- and Nanoporous Materials Produced Using Accelerated Heavy Ion Beams // Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol. 2011. V. 2. P. 013002.
9. Burlacu A. et al. The Impact of Morphology upon the Radiation Hardness of ZnO Layers // Nanotechnology. 2008. V. 19. P. 215714.
10. Skuratov V. A. et al. Depth-Resolved Photo- and Ionoluminescence of LiF and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Nucl. Instr. Meth. B. 2012. V. 286. P. 61–66.
11. Gikal B. et al. DC-60 Heavy Ion Cyclotron Complex: First Beams and Project Parameters // Part. Nucl. Lett. 2008. V. 5, No. 7(149). P. 160–165.

12. *Гикал Б. Н. и др.* Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий // АЭ. 2007. Т. 103, вып. 6. С. 357–364.
13. *Гикал Б. Н. и др.* Проект циклотрона тяжелых ионов ДЦ-110 для промышленного применения и прикладных исследований в области нанотехнологий // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 7(163). С. 891–896.
14. *Воинов В. А.* Эфферентная терапия. Мембранный плазмаферез. М.: ОАО «Новости», 2010. 368 с.
15. *Gikal B. et al.* FLNR Heavy Ion Cyclotrons for Investigation in the Field of Condensed Matter Physics Industrial Applications // Proc. of «RUPAC2012», Saint-Petersburg, Russia, 2012. P. 172–175.
16. *Bogomolov S.* Recent Development in ECR Ion Sources at FLNR JINR // Ibid. P. 203–207.
17. *Gikal B. et al.* Heavy Ion Cyclotron Beam Scanning System of DC-110 Accelerator // Part. Nucl. Lett. 2010. V. 7, No. 7. P. 1–4.

Получено 18 июля 2013 г.