

УДК 621.384.633

## ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК ЦИКЛОТРОНА ЦИТРЕК

*Ю. Н. Денисов, С. Н. Доля, В. В. Калиниченко,  
Г. А. Карамышева, С. А. Костромин, С. Б. Федоренко*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Циклотрон ЦИТРЕК предназначен для облучения полимерных пленок, используемых в производстве разделяющих и фильтрующих элементов медицинского, промышленного и бытового назначения. В августе 2002 г. состоялся пуск циклотрона ЦИТРЕК — был ускорен и выведен пучок ионов  $^{40}\text{Ar}^{8+}$  с энергией 2,4 МэВ/нуклон и интенсивностью выведенного пучка 200 нА, при этом эффективность вывода составила  $\sim 50\%$ .

The industrial cyclotron CYTRACK is dedicated to produce the track membranes. It is the basic instrument for the industry of membrane products to be consumed in medicine, biotechnology, pharmacology, microelectronics and many other industries. Cyclotron CYTRACK started working in August 2002. Argon ions were accelerated to the project energy — 2.4 MeV/nucleon, extracted beam intensity was about 200 nA, extraction efficiency totaled  $\sim 50\%$ .

### 1. ИЗОХРОННЫЙ ЦИКЛОТРОН ЦИТРЕК

Ускоритель ЦИТРЕК представляет собой изохронный циклотрон с азимутальной вариацией магнитного поля, аксиальной инжекцией ионов, высокочастотной ускоряющей системой и электростатической системой вывода. Основные технические характеристики циклотрона ЦИТРЕК [1] приведены в таблице.

На рис. 1 показан общий вид ускорителя. На рис. 2 представлен вид циклотрона в плане, где обозначены, в частности, четыре сектора S на полюсе электромагнита, два дуанта D1 и D2 высокочастотной ускоряющей системы, электростатические дефлекторы ESD1, ESD2 и пассивный магнитный фокусирующий канал FD.

Для циклотрона ЦИТРЕК используется источник ионов ЭЦР-типа. Энергия ионов, извлекаемых из источника, составляет 3 кэВ/нуклон, интенсивность пучка аргона на цилиндре Фарадея, расположенном в блоке диагностики в начале линии инжекции, порядка 3–5 мкА. В системе инжекции предусмотрен банчер. Система инжекции включает в себя также ионопровод, анализирующий и поворотный двухсекционный магнит, элементы фокусировки и юстировки пучка.

Для поворота пучка ионов из вертикальной в горизонтальную плоскость циклотрона ЦИТРЕК применяется спиральный электростатический инфлектор. Предусмотрен механизм, обеспечивающий поворот инфлектора вокруг оси ( $\pm 8^\circ$ ) для подстройки траектории ионов под стартовый радиус и стартовый угол для оптимизации начальных условий ускорения ионов в циклотроне. Ионы инжектируются в камеру циклотрона на радиус 5,3 см.

Ведущее и фокусирующее магнитное поле создается при помощи Ш-образного электромагнита с четырьмя секторными шиммами.

Для ускорения ионов в магнитном поле циклотрона используется высокочастотная ускоряющая система, настраиваемая на фиксированную частоту. ВЧ-система состоит из

Ускоряемые ионы	$^{40}\text{Ar}^{8+}$
Тип инъекции	Аксиальная
Тип ионного источника	ЭЦР
Энергия, МэВ/нуклон, начальная	0,003
конечная	2,4
Радиус ускорения, мм, начальный	53
конечный	730
Эффективность вывода, %	50
Интенсивность выведенного пучка, нА	200
Рабочий вакуум, торр	$3 \cdot 10^{-7}$
Магнит	
Габаритные размеры магнита, м	$3,7 \times 2 \times 1,65$
Масса магнита, т	83
Уровень магнитного поля, Тл	1,48
Зазор между полюсами, мм, в холме	40
в долине	100
Ускоряющая система	
Количество дуантов	2
Напряжение на дуантах, кВ	40–50
Резонансная частота, МГц	18,258
Кратность ускорения	4
Азимутальная протяженность, °	45
Добротность	3500
Инфлектор	
Электрический радиус (физическая высота), мм	20
Ширина электродов, мм	20
Напряжение на электродах, кВ	$\pm 7,5$
Зазор между потенциальными пластинами, мм	10
Система вывода	
Количество дефлекторов	2
Азимутальная протяженность, °	21 и 28
Напряжение на дефлекторах, кВ	40–50

двух четвертьволновых резонаторов с ускоряющими электродами в виде дуантов. ВЧ-резонаторы обеспечивают получение частотного диапазона 18,25–18,6 МГц. Два дуанта ускоряющей системы имеют азимутальную протяженность  $45^\circ$  и размещены в противоположных долинах магнитной системы.

Система вывода включает в себя две секции электростатического дефлектора с угловой протяженностью  $21^\circ$  (ESD1 на рис. 2) и  $28^\circ$  (ESD2 на рис. 2), три измерительных пробника тока пучка (входной, промежуточный, выходной) и пассивный магнитный канал FD с угловой протяженностью  $17^\circ$ , предназначенный для радиальной фокусировки пучка в зоне вывода. Радиальная апертура дефлекторов 7,5 мм. Напряжение на дефлекторах может регулироваться от 0 до 53 кВ.

После вывода из камеры циклотрона пучок транспортируется по вакуумному тракту, в котором имеются: поворотный магнит (см. на рис. 2 SM), две квадрупольные линзы, фокусирующие пучок ионов в горизонтальном и вертикальном направлениях, корректи-



Рис. 1. Общий вид ускорителя

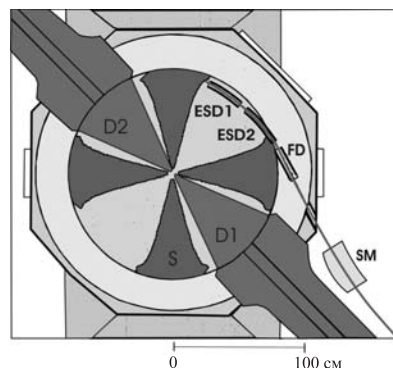


Рис. 2. Вид в плане

рующий в вертикальном направлении магнит. Для облучения полимерных пленок требуется однородный по интенсивности пучок шириной около 30 см, поэтому предусмотрено использование сканирующего магнита, создающего синусоидальное горизонтальное колебательное движение пучка.

Облучательное устройство состоит из вакуумной камеры со специальным лентопротяжным механизмом, обеспечивающим постоянную скорость протяжки пленки в вертикальном направлении в интервале скоростей 2–80 см/с.

Система диагностики состоит из цилиндра Фарадея блока диагностики, 30-канального профилометра блока диагностики, двух четырехканальных профилометров тракта транспортировки, подвижного профилометра облучательной установки и пяти дифференциальных пробников в камере циклотрона.

Непрерывный стационарный дозиметрический контроль радиационной обстановки в здании ускорителя осуществляется с помощью автоматизированной системы дозиметрического контроля. Информация поступает с трех датчиков, расположенных возле зоны вывода пучка из циклотрона, над трактом пучка и около камеры для облучения пленки.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Во время пусконаладочных работ в циклотроне ускоряли ионы аргона с  $A/Z = 5$  при ускоряющем напряжении 40 кВ до энергии 2,4 МэВ/нуклон.

На рис. 3 показан портрет пучка на мониторе управляющего компьютера с профилометра, расположенного в линии инъекции. На рис. 4 представлена зависимость интенсивности пучка от радиуса (в процессе наладки циклотрона), полученная с интегрального пробника, расположенного в середине долины магнита.

Выводные устройства были выставлены в расчетные положения. Добиваясь получения максимального тока на выходе из второго дефлектора, эмпирически оптимизировали

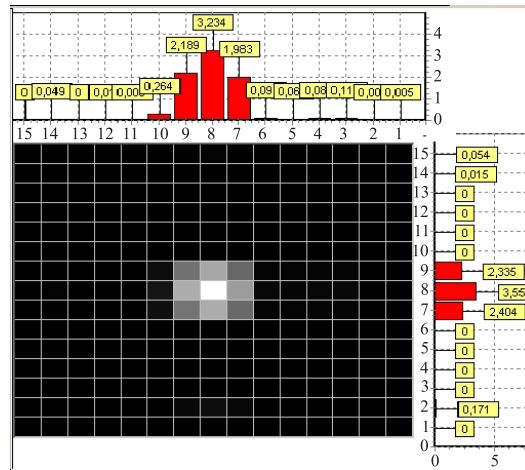


Рис. 3. Профиль пучка на профилемере в линии инжекции (расстояние между проволоками 5 мм)

положения дефлекторов и напряжения на них. Величина коэффициента вывода составила 50 %.

Для того чтобы облученная ионами аргона пленка соответствовала техническим требованиям (основное требование к параметрам трековых мембран сводится к необходимости обеспечить одинаковую плотность отверстий по всей площади трековой мембраны с погрешностью не более чем  $\pm 10\%$ ), был проведен ряд экспериментов по использованию различных режимов облучения. В частности, варьировались следующие параметры облучения: скорость протяжки пленки, горизонтальный размер пучка и величина напряжения на сканирующем магните.

Скорость протяжки должна соответствовать интенсивности пучка, с тем чтобы обеспечить требуемую плотность отверстий. От амплитуды напряжения на сканирующем магните и горизонтального размера пучка зависит равномерность облучения пленки в поперечном направлении.

Значение тока пучка у камеры для облучения пленки составляло  $\approx 200$  нА. При таком токе можно производить облучение мишени на скорости протяжки 12,5 см/с, что достаточно для эффективной работы комплекса.

Теоретические расчеты и экспериментальные данные показали, что равномерность облучения увеличивается при увеличении радиального размера пучка, поэтому горизонтальную фокусировку второго квадруполя было решено заменить на вертикальную, таким образом, ширина пучка составила порядка 20 см, что позволило добиться требуемой однородности распределения пучка на мишени при работе сканирующего магнита (рис. 5).

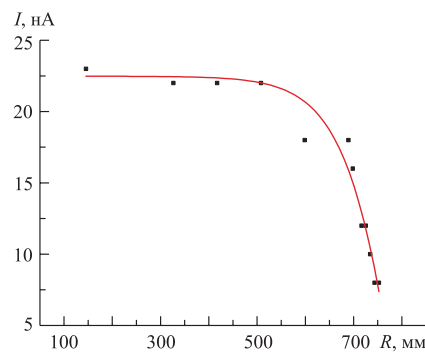


Рис. 4. Зависимость интенсивности пучка от радиуса

В процессе работы были выбраны следующие оптимальные параметры для облучения: напряжение на сканирующем магните 73 В, скорость протяжки пленки 12,5 см/с (при работе ускорителя с банчированным пучком).

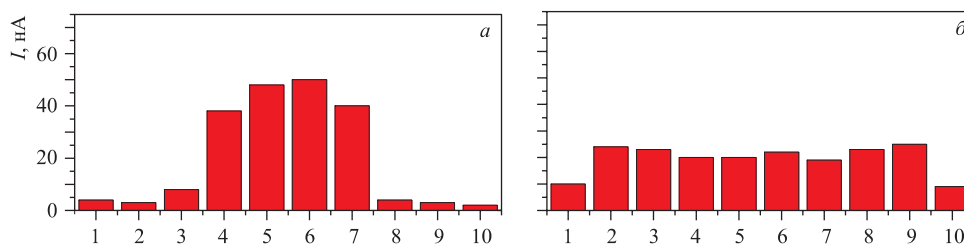


Рис. 5. Сигналы с профилометра облучательного устройства: а) без сканирования; б) при включенном сканирующем магните

Однородность облучения в продольном направлении нарушается пробоями, периодически возникающими при работе циклотрона на инфлекторе, дефлекторах и дуантах. Однако пробои длятся, как правило, доли секунды, скорость мишени невелика — 12,5 см/с, поэтому за время пробоя пленка проходит единицы сантиметров, что при вертикальном размере пучка  $\approx 6$  см приводит к уменьшению уровня облучения не более чем на 20 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Запуск циклотрона ЦИТРЕК позволил получить выведенный пучок восьмизарядных ионов аргона с энергией 2,4 МэВ/нуклон и интенсивностью 200 нА. Величина коэффициента вывода ускоренных ионов из циклотрона составила около 50 %. Были подобраны режимы облучения пленки с необходимыми для производства фильтров параметрами. Равномерность облучения в поперечном направлении обеспечивалась сканированием пучка с напряжением на сканирующем магните 73 В, равномерность в продольном направлении — постоянством скорости протяжки пленки и стабильностью тока пучка ионов на протяжении всего цикла облучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аленицкий Ю. Г. и др. Разработка и создание облучательного комплекса «Альфа» для производства трековых мембран // АЭ. 2004. Т. 97, вып. 1. С. 33–40.