

P9-2004-12

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

ВЫБОР РЕЖИМА ОБЛУЧЕНИЯ  
ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК  
УСКОРЕННЫМИ ИОНАМИ  $^{40}\text{Ar}^{8+}$   
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН

Направлено в журнал «Прикладная физика»

Денисов Ю. Н. и др.

P9-2004-12

Выбор режима облучения полимерных пленок  
ускоренными ионами  $^{40}\text{Ar}^{8+}$  для производства трековых мембран

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 ~ 50 %.

В процессе проведения пусконаладочных работ были подобраны режимы облучения пленок из полиэтилентерефталата с необходимыми для производства плазмочистых «Роса» 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 во время всего цикла облучения.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Перевод авторов

Denisov Yu. N. et al.

P9-2004-12

Strategy Selection of Film Irradiation by Accelerated  $^{40}\text{Ar}^{8+}$  Ions  
for Manufacturing of Track Membranes

The industrial cyclotron CYTRACK is dedicated to the production of 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.

The cyclotron CYTRACK started working in the August of 2002. Argon ions were accelerated to a project energy of 2.4 MeV/nucleon, the extracted beam intensity was about 200 nA, the extraction efficiency totaled ~ 50 %.

In starting up operation the film was exposed in various controlled ways to charged particles with a view to achieving the values of parameters required for production of «Rosa» membranous plasmafilters. The pore uniformity in transverse direction was provided by beam scanning with a scanning magnet voltage of 73 V, the one in the longitudinal direction was provided by constancy of the film motion rate and stability of beam intensity during all the time of exposition.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

## **ВВЕДЕНИЕ**

В Объединенном институте ядерных исследований для холдинговой компании “Трекпор технолоджи” разработан и изготовлен облучательный комплекс “Альфа” [1], предназначенный для облучения полимерных пленок, используемых в производстве трековых мембран, необходимых для изготовления разделяющих и фильтрующих элементов медицинского, промышленного и бытового назначения.

Трековая мембрана — полимерная пленка из лавсана (полиэтилентерефталата) или поликарбоната толщиной от 10 до 25 мкм, в которой создана система сквозных пор. Основное требование к параметрам трековых мембран сводится к необходимости обеспечить одинаковую плотность отверстий по всей площади трековой мембраны с погрешностью не более чем  $\pm 10\%$ .

Облучение пленки в комплексе “Альфа” осуществляется ионами аргона, ускоренными в изохронном циклотроне ЦИТРЕК до энергии 2,4 МэВ/нуклон. Для обеспечения необходимой однородности распределения частиц на мишени при помощи сканирующего магнита создается синусоидальное горизонтальное колебательное движение пучка с частотой 50 Гц. Вертикальная развертка обеспечивается движением пленки.

Для того чтобы облученная пленка соответствовала техническим требованиям, был проведен ряд расчетов и 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. Размер пучка на облучательном устройстве определяется параметрами магнитных элементов канала транспортировки выведенного пучка.

## **СИСТЕМА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА И КАМЕРА ДЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ ПЛЕНКИ**

После вывода из камеры циклотрона пучок транспортируется по вакуумному тракту, в котором предусмотрены:

- ионопровод переменного сечения длиной около 11 м, стыкующийся на своем входе с фланцем камеры циклотрона и соединяющийся на выходе с фланцем окна облучательной установки. Его ширина линейно увеличивается с приближением к окну облучательного устройства, где достигает 400 мм (см. рис. 1);
- поворотный магнит, находящийся в непосредственной близости от вакуумной камеры ускорителя и предназначенный для поворота выведенного пучка в ионопровод тракта (см. на рис. 3, *a* — ВМ);
- две квадрупольные линзы Q1 и Q2, фокусирующие пучок ионов в горизонтальном и вертикальном направлениях;
- магнит-корректор, отклоняющий пучок ионов в вертикальном направлении на  $\pm 0,4^\circ$ ;
- сканирующее устройство, распределяющее ускоренные ионы по ширине облучаемой пленки. Расстояние от сканирующего магнита до облучательного устройства равно 8 м.

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

Вакуумная камера тракта проводки пучка ускоренных ионов откачивается до давления  $\sim 5 \cdot 10^{-7}$  торр тремя диффузионными насосами с азотными ловушками на входных патрубках. Облучательная установка, разделенная диафрагмой на два вакуумных объема, откачивается двумя турбомолекулярными насосами до давлений  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  торр в зоне облучения пленки и до  $\sim 10^{-4}$  торр в зоне размещения лентопротяжного механизма, приемной и подающей бобин облучаемой пленки. Внешний вид канала транспортировки выведенного пучка ускоренных ионов представлен на рис. 1. На рис. 2 показана фотография камеры для облучения пленки.



Рис. 1. Тракт выведенного пучка установки. Слева виден циклотрон, справа — камера для облучения пленки

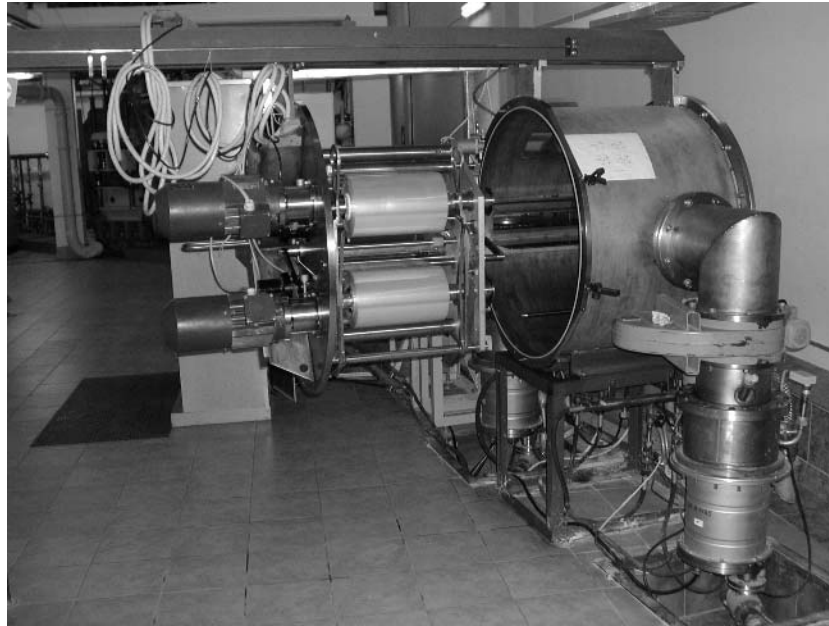


Рис. 2. Камера для облучения пленки

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Цель проведения расчетов — оценка однородности облучения пленки в поперечном направлении и величины потерь пучка ионов на облучательном устройстве при различных горизонтальных размерах пучка на мишени и различной амплитуде и форме колебаний пучка (определяется амплитудой и формой напряжения на сканирующем устройстве).

Прежде всего, по программе AGILE [2] рассчитывался тракт выведенного пучка для определения размера пучка на облучательном устройстве при различных режимах работы элементов тракта. В частности, на рис. 3, *а* показаны огибающие пучка вдоль линии транспортировки для проектных параметров элементов тракта. Видно, что пучок у облучательного устройства при этом имеет следующие размеры: по горизонтали —  $\sigma \approx 3$  см, по вертикали —  $\sigma \approx 4$  см. На рис. 3, *б* приведены огибающие пучка для режима работы с двумя фокусирующими по вертикали квадрупольями. В дальнейшем будет показано, что именно этот режим оптимален с точки зрения достижения необходимых параметров облучаемой пленки. Размеры пучка при этом равны: по горизонтали —  $\sigma \approx 8$  см, по вертикали —  $\sigma \approx 3$  см. Уменьшение вертикального

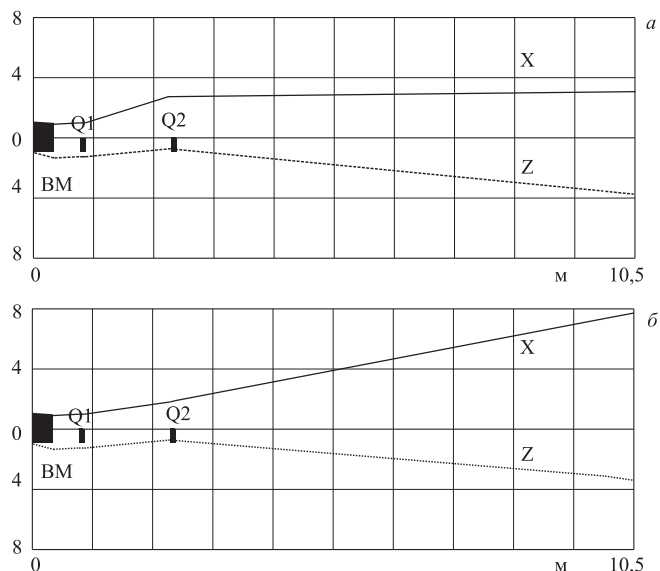


Рис. 3. Огибающие пучка (полуразмер) в линии транспортировки: *a*) проектный вариант, *б*) оптимальный вариант

размера пучка приведет к некоторому уменьшению потерь, так как входное отверстие в облучательное устройство имеет высоту 6 см.

Были проведены расчеты колебательного движения пучка из 1000 нормально распределенных частиц. Для трех горизонтальных размеров пучка  $\sigma = 0,5$  см,  $\sigma = 3$  см и  $\sigma = 8$  см результаты расчетов показаны на рис. 4. В левой колонке представлены гистограммы распределения пучка при синусоидальной форме напряжения на сканирующем магните, в правой — при пилообразной. Величина напряжения на сканирующем магните обеспечивает амплитуду колебаний пучка, равную 15 см (кроме рис. 4, *a*, где амплитуда колебаний пучка достигает 25 см). На всех рисунках частицы заполняют пространство протяженностью более 30 см (ширина облучаемой пленки), равномерность же облучения различна для различных режимов. В частности, видно, что при идеально пилообразной форме напряжения на сканирующем магните необходимо использовать возможно более узкий по горизонтали пучок (на рис. 4, *б* потери почти отсутствуют, при практически идеальной однородности облучения). Для проектного размера пучка потери составляют менее 20 % (см. рис 4, *г* — теряются частицы, расположенные по краям, за пределами ширины пленки), при этом равномерность облучения — не хуже  $\pm 5$  %.

Во время пуска циклотрона ЦИТРЕК источник питания сканирующего магнита обеспечивал напряжение синусоидальной формы. Из рис. 4, *a*, *в*, *д*

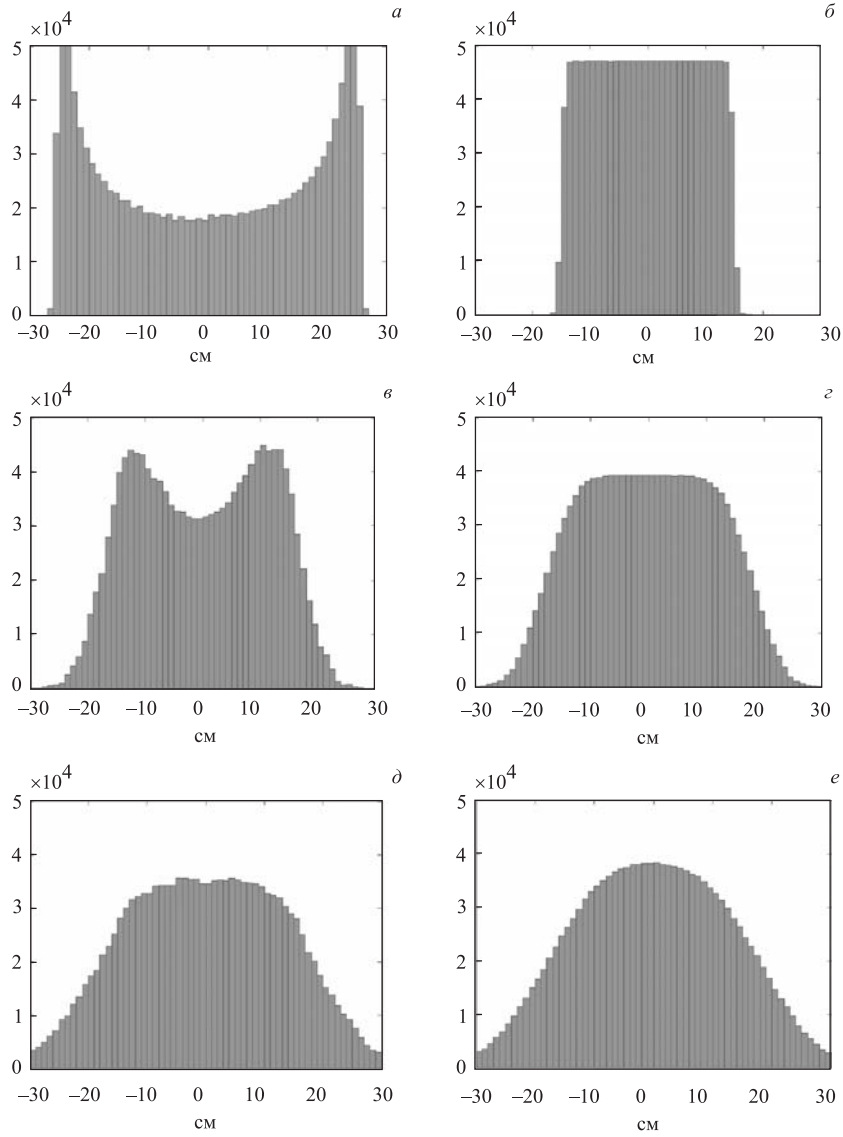


Рис. 4. Гистограммы горизонтального распределения частиц, слева — при синусоидальной форме напряжения на сканирующем магните, справа — при пилообразной, для трех размеров пучка  $\sigma = 0,5; 3; 8$  см (сверху вниз)

видно, что в таком случае нецелесообразно уменьшать размеры пучка — узкий пучок дает практически равномерное распределение в центре гистограммы, однако при этом потери пучка превышают 60 %, что совершенно недопустимо.

Проектный размер пучка при синусоидальном напряжении дает разброс в плотности отверстий —  $\pm 20$  %, что также неприемлемо. При размере пучка  $\sigma = 8$  см (рис. 4, д) равномерность облучения в пределах допуска, потери частиц — менее 30 %.

Итак, численные расчеты показали: можно получить проектные значения равномерности облучения пленки, используя синусоидальное по форме напряжение на сканирующем магните. Для этого нужно увеличить горизонтальную протяженность пучка приблизительно в 2 раза. Применение пилообразного напряжения позволит уменьшить потери при облучении с 30 до 20 %, равномерность облучения также улучшится (приблизительно в 2 раза). В перспективе планируется переход на пилообразное питание для сканирующего магнита.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для настройки режимов облучения пленки у облучательного устройства предусмотрен профилометр, представляющий собой “гребенку” из 10 ламелей (ширина ламелей 4 см), предназначенный для измерения тока ионов и распределения пучка в горизонтальной плоскости.

Первые сеансы облучения пленки были произведены при величине тока 60 нА. Оказалось, что для обеспечения необходимой плотности отверстий в мишени нужно производить облучение при скорости протяжки пленки 2 см/с,

что недостаточно для рентабельного производства фильтров. Установка и настройка банчера привели к существенному увеличению тока пучка (в 3–4 раза), значение тока у камеры для облучения пленки достигло  $\approx 200$  нА. При таком токе можно производить облучение мишени на существенно более высокой скорости протяжки — 12,5 см/с, что достаточно для эффективной работы комплекса.

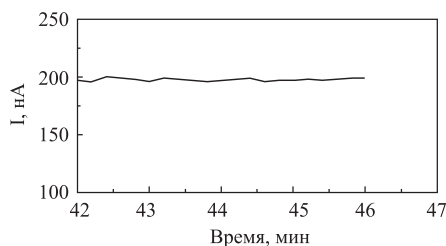


Рис. 5. Зависимость среднего тока от времени

На рис. 5 отображен суммарный ток пучка в зависимости от времени (суммирование токов со всех ламелей профилометра).

На рис. 6 показаны сигналы с профилометра при неработающем сканирующем магните. Пучок занимает около 10 см по горизонтали, расположен



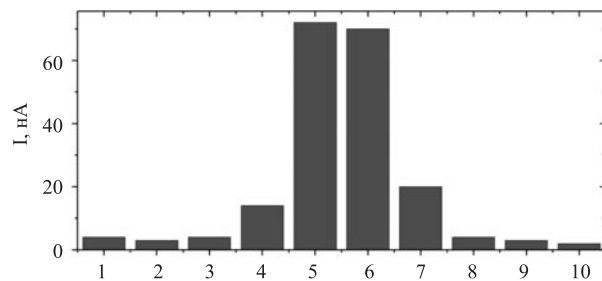


Рис. 6. Сигналы с профилометра облучательного устройства (проектный вариант, без сканирования)

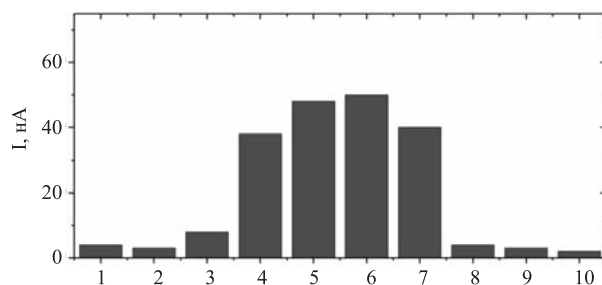


Рис. 7. Сигналы с профилометра облучательного устройства (оптимальный вариант, без сканирования)

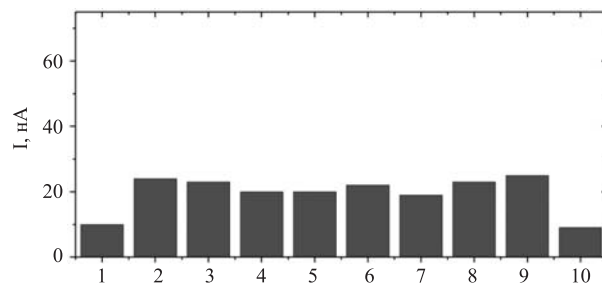


Рис. 8. Сигналы с профилометра облучательного устройства при включенном сканирующем магните (оптимальный вариант)

по центру и имеет интенсивность, равную  $\approx 200$  нА. При этом в тракте транспортировки выведенного пучка были задействованы оба фокусирующих элемента: по горизонтали и по вертикали с проектными значениями

токов питания магнитных элементов. При включении сканирующего магнита не удалось достичь необходимой равномерности облучения пленки.

Так как теоретические расчеты показали, что равномерность облучения увеличивается при увеличении радиального размера пучка, горизонтальную фокусировку второго квадрупольного элемента было решено заменить на вертикальную, в результате ширина пучка составила порядка 20 см (см. рис. 7), что позволило добиться требуемой однородности распределения пучка на мишени при работе сканирующего магнита с амплитудой напряжения 73 В (см. рис. 8). Потери пучка при этом составляют  $20 \div 30 \%$ , что хорошо согласуется с расчетными данными.

Однородность облучения в продольном направлении нарушается пробоями, периодически возникающими при работе циклотрона на инфлекторе, дефлекторах и дуантах. Однако пробой длится, 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 %.

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).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Запуск облучательного комплекса “Альфа”, осуществленный в августе 2002 г., позволил получить выведенный пучок восьмизарядных ионов аргона с энергией 2,4 МэВ/нуклон и интенсивностью выведенного пучка 200 нА, величина коэффициента вывода ускоренных ионов из циклотрона ЦИТРЕК составляет  $\sim 50 \%$ .

Были подобраны режимы облучения пленок 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.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аленицкий Ю.Г. и др. Разработка и создание облучательного комплекса “Альфа” для производства трековых мембран. Препринт ОИЯИ Р9-2004-5. Дубна, 2004.
2. Bryant P.J. “AGILE, a Tool for Interactive Lattice Design” // EPAC 2000. Vienna, 2000. P. 1357.

Получено 5 февраля 2004 г.

Редактор *М. И. Зарубина*  
Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 1.03.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,9. Тираж 270 экз. Заказ № 54316.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.  
E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)  
[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)