

УДК 621.384.633

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

Ю. Н. Денисов, С. Н. Доля, В. В. Калинин,

Г. А. Карамышева, С. Б. Федоренко

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

*Рассмотрен циклотрон ЦИТРЕК, предназначенный 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 плазмофильтров “Роса” параметрами.*

В Объединенном Институте ядерных исследований для ЗАО «Холдинговая компания “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 10—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 с помощью 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;
- поворотный магнит, находящийся в непосредственной близости от вакуумной камеры ускорителя и предназначенный для поворота выведенного пучка в ионопровод тракта;
- две квадрупольные линзы  $Q_1$  и  $Q_2$ , фокусирующие пучок ионов в горизонтальном и вертикальном направлениях;
- магнит-корректор, отклоняющий пучок ионов в вертикальном направлении на  $\pm 0,4$  град;
- 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—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, камеры для облучения пленки — на рис. 2.

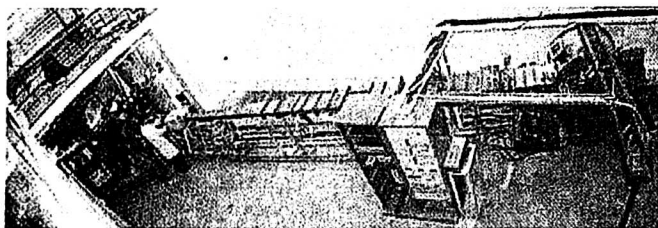


Рис. 1. Тракт выведенного пучка. Слева виден циклотрон, справа — камера для облучения пленки

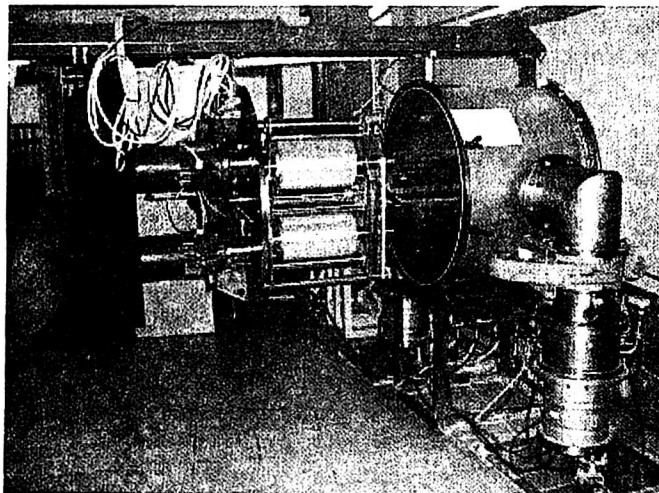


Рис. 2. Камера для облучения пленки

### 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).

По программе AGILE [2] рассчитывался тракт выведенного пучка для определения его размера 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 показаны 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 равны по горизонтали —  $\sigma \approx 8$  см, по вертикали —  $\sigma \approx 3$  см. Уменьшение вертикального размера пучка приведет к некоторому уменьшению потерь, так как входное отверстие в облучательном устройстве имеет высоту 6 см.

Были проведены расчеты колебательного движения пучка из 1000 нормально распределенных частиц. Для трех горизонтальных размеров пучка  $\sigma = 0,5; 3$  и  $8$  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, а, где амплитуда колебаний пучка достигает  $25$  см). На всех рисунках частицы заполняют протяженность 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, б — теряются частицы, расположенные по краям, за пределами ширины пленки), при этом равномерность облучения — не хуже  $\pm 5\%$ .

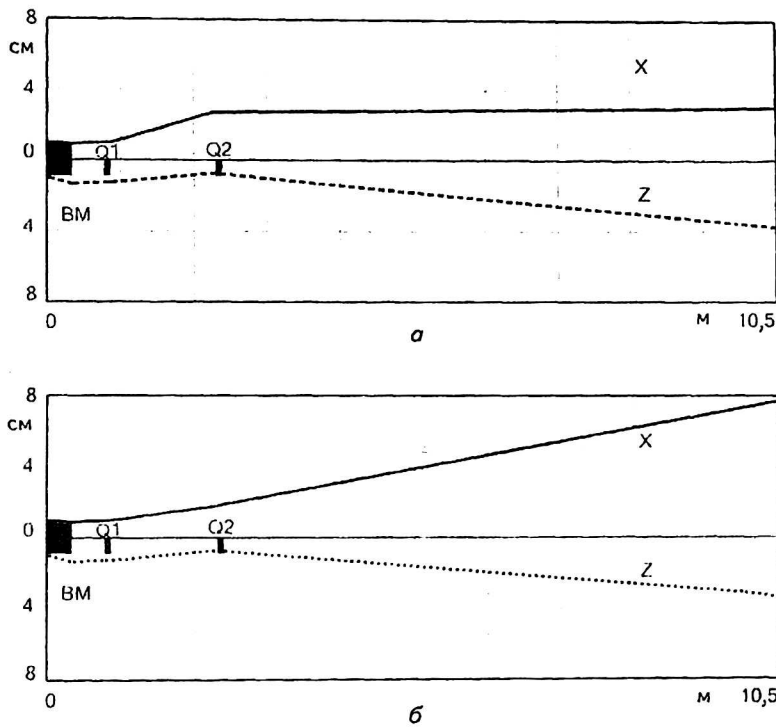
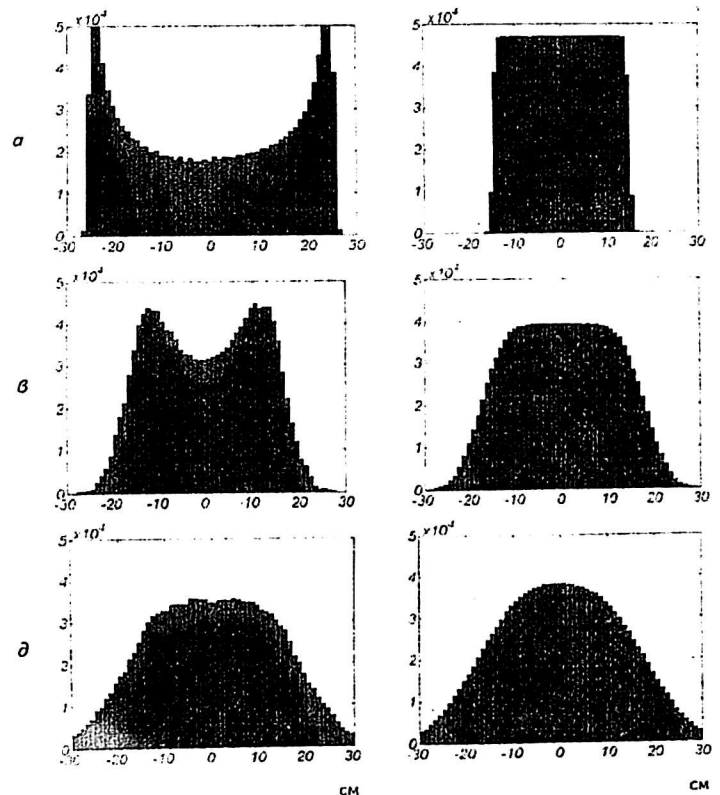


Рис. 3. Огибающие пучка (полуразмер) в линии транспортировки:  
а — проектный вариант;  
б — оптимальный вариант

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



Во время пуска циклотрона ЦИТРЕК источник питания сканирующего магнита обеспечивал напряжение синусоидальной формы. Из рис. 4, а, в, д 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 (см. рис. 4, д) равномерность облучения в пределах допуска, потери частиц — менее 30 %.

Численные расчеты показали, что можно получить проектные значения равномерности облучения пленки, используя синусоидальное по форме напряжение на сканирующем магните. Для этого необходимо увеличить горизонтальную протяженность пучка приблизительно в два раза. Применение пилообразного напряжения позволит уменьшить потери при облучении с 30 до 20 %, равномерность облучения также улучшается (приблизительно в два 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 проведены 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 проводить облучение мишени на более высокой скорости протяжки — 12,5 см/с, что достаточно для эффективной работы комплекса.

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

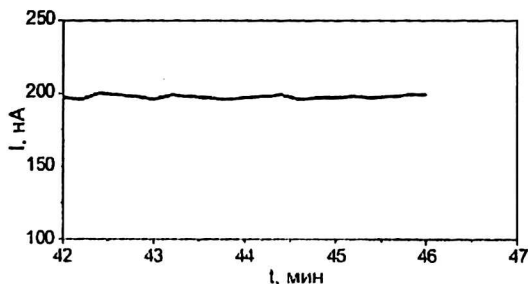


Рис. 5. Зависимость среднего тока от времени

На рис. 6, а–в показаны сигналы с профилометра при неработающем сканирующем магните. Пучок занимает около 10 см по горизонтали, расположен по центру и имеет интенсивность  $\approx 200$  нА. При этом в тракте транспортировки выведенного пучка были задействованы оба фокусирующих элемента: по горизонтали и вертикали с проектными значениями токов питания магнитных элементов. При включении сканирующего магнита не удалось достичь необходимой равномерности облучения пленки.

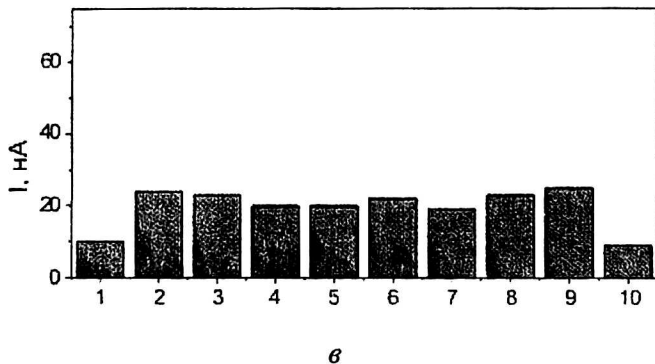
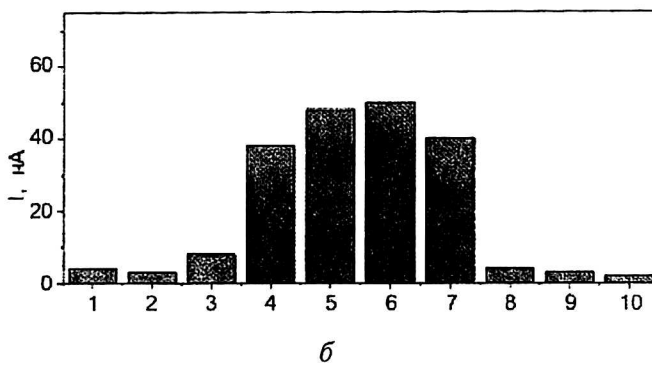
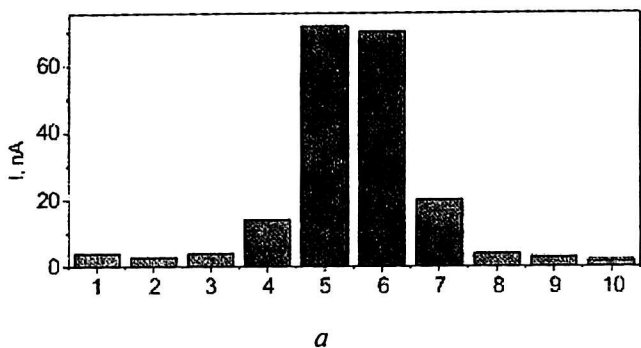


Рис. 6. Сигналы с профилометра облучательного устройства: а — проектный вариант, без сканирования; б — оптимальный вариант, без сканирования; в — оптимальный вариант, при включенном сканирующем магните

Так как теоретические расчеты показали, что равномерность облучения увеличивается при увеличении радиального размера пучка, горизонтальную фокусировку второго квадруполя было решено заменить на вертикальную, в результате ширина пучка составила порядка 20 см (см. рис. 6, б), что позволило добиться требуемой однородности распределения пучка на мишени при работе сканирующего магнита с ам-

плитудой напряжения 73 В (см. рис. 6, в). Потери пучка при этом составляют 20–30 %, что хорошо согласуется с расчетными данными.

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

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 банчируемым пучком).

### Заключение

Запуск облучательного комплекса “Альфа”, осуществленный в августе 2002 г., позволил по-

лучить 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 около 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., Василенко А. Т., Вылов Ц. Д. и др. Разработка и создание облучательного комплекса “Альфа” для производства трековых мембран: Препринт ОИЯИ Р-9-2004-5. Дубна, 2004.
2. Bryant P. J. Agile, a tool for interactive lattice design. ерас 2000. Vienna. 2000. P. 1357.

## Strategy selection of film irradiation by accelerated $^{40}\text{Ar}^{8+}$ ions for manufacturing of track membranes

Yu. N. Denisov, S. N. Dolya, V. V. Kalinichenko, G. A. Karamysheva, S. B. Fedorenko  
Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*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. 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 achieve the values of parameters required for production of “Rosa” membranous plasmafilters.*