

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЕНИЯ ИОНОВ КРИПТОНА ПОНИЖЕННОЙ ЗАРЯДНОСТИ В ЦИКЛОТРОНЕ ЦИТРЕК

Ю. Н. Денисов, Г. А. Карамышева, О. В. Карамышев, О. В. Ломакина

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Приведены результаты численных расчетов динамики движения ионов криптона пониженной зарядности в циклотроне ЦИТРЕК, первом в мире промышленном циклотроне, предназначенном для производства трековых мембран. Расчеты показали возможность ускорения ионов $^{84}\text{Kr}^{+11}$ в сформированном магнитном поле циклотрона при увеличении уровня среднего поля на 1,6 % на шестой кратности частоты ускоряющей системы. Энергия пучка будет достаточна для облучения пленки толщиной до 10 мкм.

The basic results of numeric simulations of krypton ion motion with decreased charge in cyclotron CYTRACK are presented. Cyclotron CYTRACK is the world's first industrial cyclotron intended to produce the track membranes. Computer modeling confirms the possibility of $^{84}\text{Kr}^{+11}$ ion acceleration in the formed magnetic field with increase of the magnetic field level by 1.6 % on the sixth harmonic of the accelerating system. Beam energy will be sufficient for exposure of the film with thickness 10 μm .

ВВЕДЕНИЕ

Циклотрон ЦИТРЕК [1, 2], предназначенный для облучения полимерных пленок, используемых в производстве разделяющих и фильтрующих элементов медицинского, промышленного и бытового назначения, был разработан и изготовлен в Объединенном институте ядерных исследований. Циклотрон предназначен для ускорения тяжелых ионов с $A/Z \approx 5$ до энергии 2,4 МэВ/нуклон. В августе 2002 г. состоялся пуск циклотрона ЦИТРЕК — был ускорен и выведен пучок ионов $^{40}\text{Ar}^{8+}$ [3]. Первый в мире промышленный циклотрон для производства трековых мембран стал основной установкой НПК «Альфа» для создания медицинской техники для мембранного плазмафереза. Сегодня НПК «Альфа» — это уникальный научно-производственный комплекс, осуществляющий серийный выпуск трековых мембран (с диаметром поры 400 нм), а также медицинских изделий для плазмафереза. Трековая мембрана — это полимерная пленка из лавсана (полиэтилентерефталата) или поликарбоната толщиной от 10 до 25 мкм, в которой создана система сквозных пор.

Для улучшения качества производимых мембран с целью расширения их ассортимента и области применения необходимо облучать пленку более тяжелыми ионами, в частности ускоренными ионами криптона. Однако работающий в настоящее время ЭЦР-источник не вырабатывает криптон нужной зарядности. В работе проанализирована возможность ускорения ионов криптона с зарядностью ниже проектной, а именно 11+ и 12+.

1. ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛОТРОНА ЦИТРЕК

Ускоритель ЦИТРЕК представляет собой изохронный циклотрон с азимутальной вариацией магнитного поля (четырёхсекторная структура), аксиальной инъекцией ионов, высокочастотной ускоряющей системой и электростатической системой вывода. Основные технические характеристики циклотрона ЦИТРЕК приведены в табл. 1. На рис. 1 показан общий вид ускорителя.

Источник ионов ЭЦР-типа производит ионы с энергией 3 кэВ/нуклон, интенсивность пучка аргона на цилиндре Фарадея, расположенном в блоке диагностики в начале ли-

Таблица 1. Основные технические характеристики циклотрона ЦИТРЕК

Ускоряемые ионы	$^{40}\text{Ar}^{8+}$
Тип инъекции	Аксиальная
Начальная энергия, МэВ/нуклон	0,003
Конечная энергия, МэВ/нуклон	2,4
Конечный радиус ускорения, мм	730
Рабочий вакуум, Торр	$3 \cdot 10^{-7}$
Габаритные размеры магнита, м	$3,7 \times 2 \times 1,65$
Вес магнита, т	83
Уровень магнитного поля, Тл	1,48
Количество дуантов	2
Напряжение на дуантах, кВ	40
Резонансная частота, МГц	18,25
Кратность ускорения	4

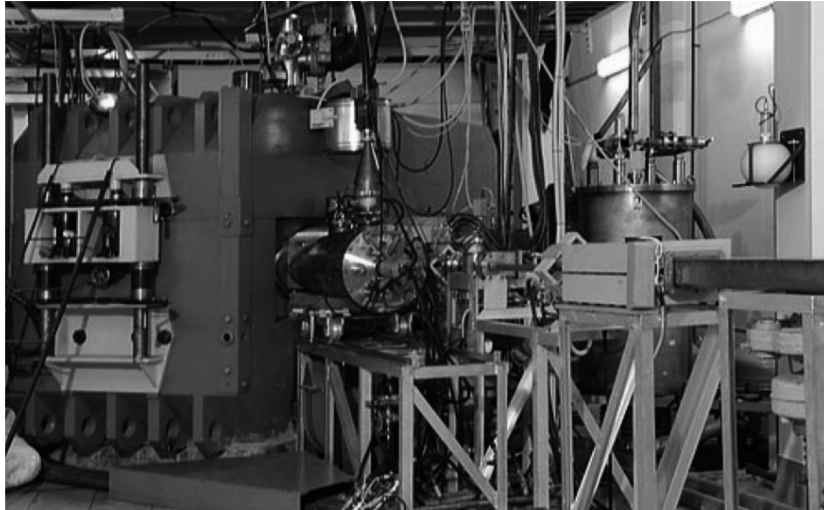


Рис. 1. Общий вид ускорителя

нии инъекции, составляет порядка 10 мкА. В системе инъекции предусмотрен банчер. Система инъекции 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 с целью оптимизации начальных условий ускорения ионов в циклотроне. Ионы инжектируются в камеру циклотрона на радиус 5,3 см.

Для ускорения ионов в магнитном поле циклотрона используется высокочастотная ускоряющая система, настраиваемая на фиксированную частоту. ВЧ-система состоит из двух четвертьволновых резонаторов с ускоряющими электродами в виде дуантов. ВЧ-резонаторы обеспечивают получение частотного диапазона 18,250–18,600 МГц. Два дуанта ускоряющей системы имеют азимутальную протяженность 45° и размещены в противоположных долинах магнитной системы.

2. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕНТРА ЦИКЛОТРОНА ЦИТРЕК

Для проведения анализа возможности ускорения ионов криптона пониженной зарядности была создана точная модель центра циклотрона, включающая инфлектор, корпус инфлектора, ускоряющие электроды (рис. 2). С целью проверки адекватности разработанной модели и обеспечения достоверности последующих расчетов, прежде всего, было промоделировано движение пучка ионов аргона с проектным $A/Z = 5$.

Моделирование динамики частиц осуществлялось в магнитном поле, полученном в результате измерений на магните циклотрона [4], ускоряющее электрическое поле рассчитывалось по описанной выше модели.

Был произведен расчет инъекции непрерывного несгруппированного пучка ионов (beam train). Начальные поперечные координаты и импульсы ионов были распределены

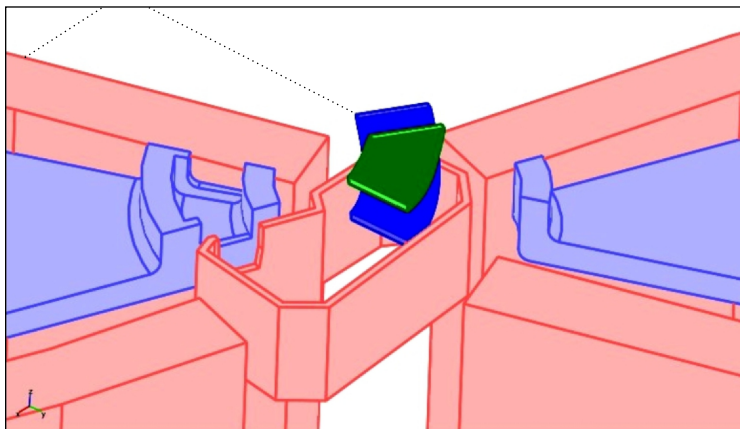


Рис. 2. Модель центра циклотрона ЦИТРЕК

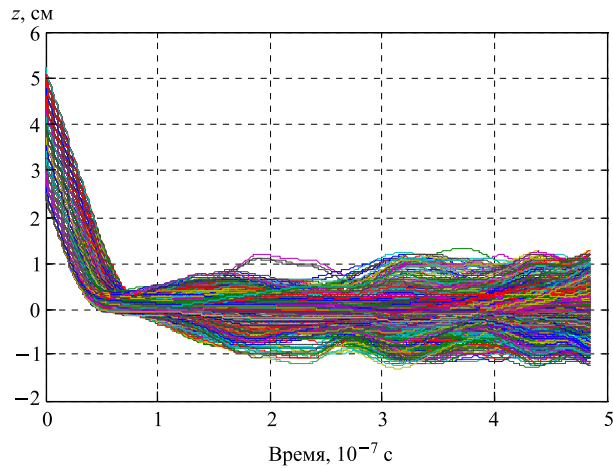


Рис. 3. Вертикальное движение пучка в зависимости от времени

случайным образом внутри эмиттансов: $30\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, все начальные продольные координаты частиц соответствовали полупериоду ВЧ с шагом 10° ВЧ.

Частицы, попавшие в апертуру ускорителя (1,6 см — первый оборот, 2,4 см — все последующие обороты), составили около 35 % от инжектируемых модельных ионов. Вертикальное движение оставшихся в апертуре частиц показано на рис. 3. Только часть этих частиц попадает в ускоряющий зазор в нужной фазе и как следствие вовлекается в процесс ускорения. В результате расчетная эффективность центра циклотрона ЦИТРЕК составила около 5 %, что подтверждается экспериментальными данными: интенсивность пучка в линии инжекции, измеренная при помощи цилиндра Фарадея, и интенсивность пучка на радиусе 10 см, измеренная при помощи радиального пробника, соответствуют коэффициенту прохождения пучка около 5 % [3].

Невысокая эффективность центра ЦИТРЕК в основном объясняется большими вертикальными потерями пучка. Эти потери в циклотроне ЦИТРЕК большие по двум причинам.

Первая заключается в том, что после вылета из инфлектора расходящийся по вертикали пучок прежде чем попадает в ускоряющий зазор долгое время дрейфует в зоне, где полностью отсутствует аксиальная фокусировка. Такая геометрия центра проста для проектирования и изготовления, позволяет не заниматься оптимизацией формы носиков дуантов и положения диафрагм фазовой селекции. Однако для уменьшения вертикальных потерь необходимо приближать ускоряющий зазор к выходу из инфлектора, а далее находить оптимальную геометрию центра для заданного распределения среднего магнитного поля.

Вторая причина кроется в неоптимальности изменения магнитного поля в центре циклотрона вдоль радиуса (рис. 4). Растущее вплоть до 8 см среднее поле затрудняет создание сдвига фазы, способствующего усилению электрической фокусировки.

Дополнительные потери пучка связаны с низким напряжением на дуантах — проектное напряжение 50 кВ, видимо, привело бы к некоторому увеличению коэффициента

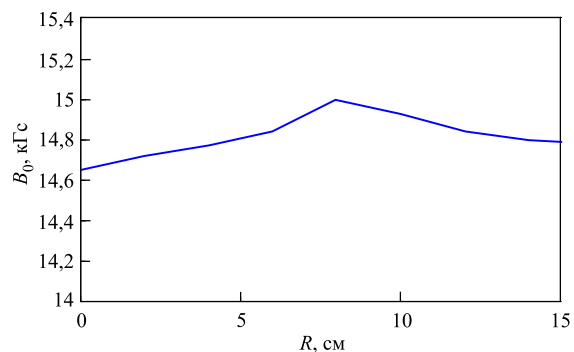


Рис. 4. Среднее магнитное поле в центре циклотрона

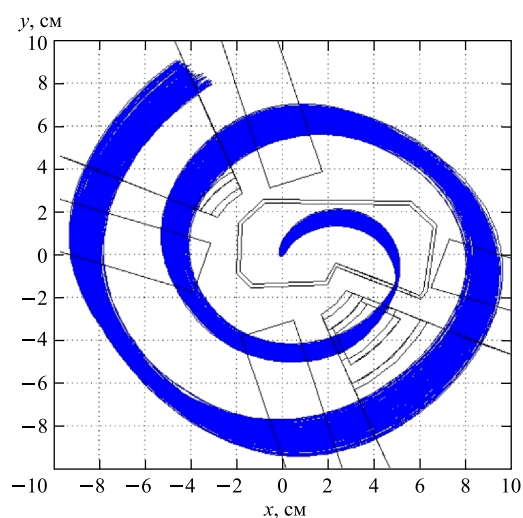


Рис. 5. Траектории пучка ионов аргона в центре циклотрона ЦИТРЕК

захвата, так как при рабочем напряжении 40 кВ часть ионов теряется на корпусе инфлектора и не попадает во второй дуант.

Расчеты ускорения пучка ионов аргона в новой модели центра циклотрона показали хорошее соответствие полученных результатов (рис. 5) экспериментальным данным, что гарантирует достоверность представленных ниже расчетов ускорения ионов криптона пониженной зарядности.

3. УСКОРЕНИЕ ИОНОВ КРИПТОНА В ЦИКЛОТРОНЕ ЦИТРЕК

Нашей целью является ускорение ионов криптона пониженной зарядности на той же частоте генератора, что и ускорение ионов аргона с $A/Z = 5$, а именно 18,25 МГц. Без изменения частоты ВЧ-системы ускорение ионов пониженной зарядности будет осуществляться на более высокой кратности частоты ВЧ-системы. Напомним, что проектные ионы ускоряются на четвертой кратности.

Прежде всего, определимся с зарядом ускоряемого иона, а следовательно, с соответствующей кратностью ускорения. Практическое применение будут иметь ионы криптона с энергией не ниже чем 1 МэВ/нуклон. При ускорении ионов криптона 8+ или 9+ на восьмой кратности частоты ВЧ-системы конечная энергия составит около 0,6 МэВ/нуклон, что явно недостаточно. Поэтому мы ограничились анализом возможности ускорения ионов криптона на кратности частоты ускоряющего поля не выше чем шесть. Для такого режима ускорения ионы криптона с зарядом 11+ и 12+ будут иметь наиболее близкую частоту обращения в сформированном магнитном поле циклотрона, что определило их выбор для проведения представленных ниже расчетов.

В циклотроне ускорение ионов с зарядностью, отличной от проектной, сопряжено с рядом проблем.

Во-первых, ионы с непроектным A/Z инжектируются на другую стартовую позицию, поэтому для позиционирования пучка на равновесной ускоренной орбите необходимо, прежде всего, уменьшить энергию инжекции иона.

Во-вторых, в нашем случае невозможно ускорить ионы только за счет кратного изменения частоты, дополнительно необходимо менять уровень магнитного поля. Сильное изменение уровня магнитного поля может привести к нарушению сформированного изохронного роста среднего поля.

И третье, зависимость среднего магнитного поля вдоль радиуса циклотрона формируется под ион с заданным A/Z , т.е. изменению заряда ионов должно соответствовать изменение зависимости среднего поля вдоль радиуса. Отсутствие в циклотроне ЦИТРЕК катушек коррекции магнитного поля ограничивает возможности ускорения ионов с непроектными значениями A/Z .

3.1. Моделирование инжекции. Прежде всего убедимся, что возможно инжектировать пучок на равновесную орбиту, т.е. в том, что ионы криптона попадут в выходное отверстие корпуса инфлектора, причем выйдут на стартовые позиции.

Моделирование движения ионов осуществлялось в спроектированной и созданной для ускорения ионов с $A/Z = 5$ геометрии центра (см. модель на рис. 2). Расчеты показали, что пучок ионов $^{84}\text{Kr}^{+11}$ с проектной энергией не попадет в окошко корпуса инфлектора, так как его орбита выходит на слишком большой радиус при приближении к первому ускоряющему зазору. Траектория центрального иона $^{84}\text{Kr}^{+11}$ с проектной энергией $15 \text{ кэВ} \cdot Z$ внутри инфлектора представлена на рис. 6. Траектория иона $^{84}\text{Kr}^{+11}$ с уменьшенной до $10 \text{ кэВ} \cdot Z$ энергией инжекции внутри инфлектора практически не отличается от траектории проектного иона.

Поворотом инфлектора можно менять в некотором диапазоне стартовые координаты пучка, при этом их неполное соответствие стартовым координатам равновесной ускоренной орбиты можно компенсировать изменением амплитуды ускоряющего напряжения на дуантах. На рис. 7 сплошная и штрихпунктирные линии соответствуют траекториям иона для двух положений инфлектора, амплитуда ускоряющего напряжения подобрана таким образом, чтобы орбита была по возможности лучше центрирована. Сплошная линия соответствует траектории частицы при ускоряющем напряжении 41 кВ, штрихпунктирная линия соответствует траектории частицы при ускоряющем напряжении 60 кВ.

Таким образом, расчеты центра циклотрона показали, что необходимо уменьшить энергию инжекции пучка, далее поворотом инфлектора и изменением амплитуды ускоряющего напряжения точно позиционировать пучок на равновесную хорошо центрированную ускоренную орбиту.

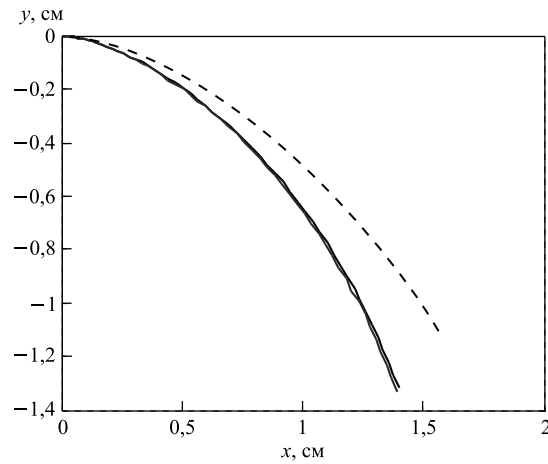


Рис. 6. Траектории иона $^{84}\text{Kr}^{+11}$ с энергией $15 \text{ кэВ} \cdot Z$ в инфлекторе — штриховая линия, иона с энергией $10 \text{ кэВ} \cdot Z$ и проектного иона — сплошные линии

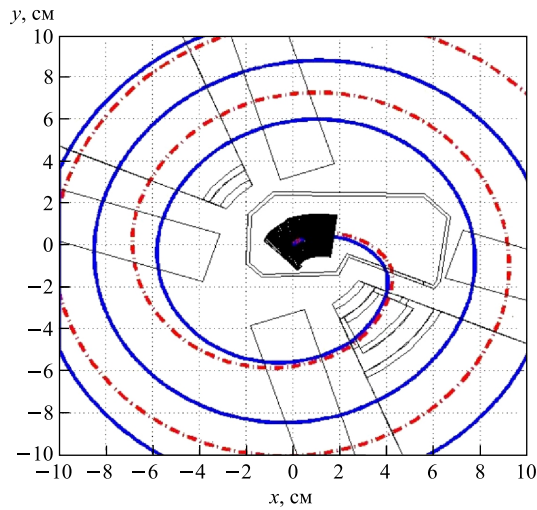


Рис. 7. Траектории центральной частицы в центре циклотрона ЦИТРЕК для разных положений инфлектора

3.2. Ускорение ионов $^{84}\text{Kr}^{+11}$. Минимального изменения уровня магнитного поля потребует ускорение ионов $^{84}\text{Kr}^{+11}$ на шестой кратности частоты ускоряющего поля, при этом энергия пучка составит $1,04 \text{ МэВ/нуклон}$.

Было промоделировано движение ионов криптона в сформированном магнитном поле циклотрона от инъекции до вывода. Расчеты показали, что для ускорения ионов $^{84}\text{Kr}^{+11}$ в сформированном поле циклотрона без изменения частоты среднее магнитное поле необходимо увеличить в $1,016$ раза. На рис. 8 слева штриховой линией показана энергия центрального иона криптона в зависимости от номера оборота в циклотроне. Критерием

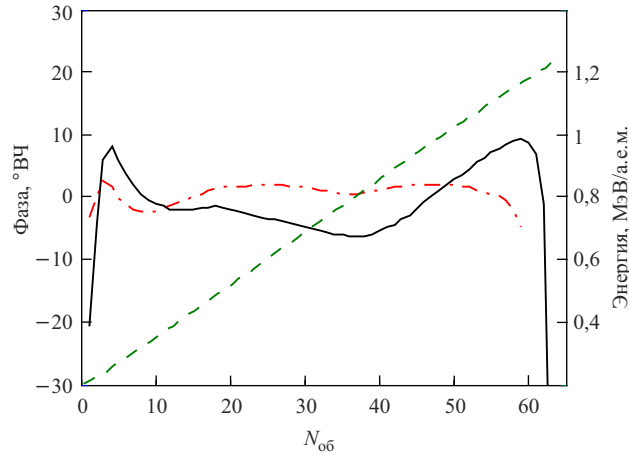


Рис. 8. Фазовое движение равновесного иона $^{84}\text{Kr}^{+11}$ — сплошная линия, Ar_{40}^{+8} — штрихпунктирная (левая шкала); зависимость энергии равновесного иона $^{84}\text{Kr}^{+11}$ от номера оборота — штриховая линия (правая шкала)

соответствия сформированного поля циклотрона изохронному полю может служить фазовый дрейф иона (изменение усредненного по четырем ускоряющим зазорам значения разности фазы иона и фазы ВЧ-системы). На рис. 8 справа видно, что дрейф фазы равновесного иона в процессе ускорения не больше $\pm 10^\circ$ ВЧ (сплошная линия), что допустимо. Для сравнения штрихпунктирной линией показано фазовое движение центрального иона аргона с $A/Z = 5$ в процессе ускорения. Видно, что дрейф фазы иона аргона составляет не больше $\pm 5^\circ$ ВЧ.

Таким образом, сформированное поле циклотрона ЦИТРЕК обеспечивает постоянство фазы равновесной частицы в процессе ускорения ионов $^{84}\text{Kr}^{+11}$ с дрейфом не более $\pm 10^\circ$ ВЧ, т.е. изохронизм сформированного поля удовлетворителен для ускорения ионов $^{84}\text{Kr}^{+11}$.

Точные параметры этого и представленных ниже режимов ускорения ионов криптона показаны в табл. 2.

Таблица 2. Параметры ускорения

Ускоряемый ион	$^{84}\text{Kr}^{+12}$	$^{84}\text{Kr}^{+12}$	$^{84}\text{Kr}^{+11}$
Начальная энергия, кэВ · Z	11	11	10
Конечная энергия, МэВ/нуклон	1,04	1,26	1,04
Напряжение на электродах инфлектора, кВ	5,5	5,5	5
Частота ВЧ-генератора, МГц	18,25	18,25	18,25
Кратность ускорения	6	5	6
Амплитуда напряжения ускоряющего поля, кВ	41	40	45
Уровень среднего поля	$B_0 \cdot 0,9315$	$B_0 \cdot 1,118$	$B_0 \cdot 1,016$

3.3. Ускорение ионов $^{84}\text{Kr}^{+12}$. Расчеты показали, что при ускорении ионов $^{84}\text{Kr}^{+12}$ на шестой кратности придется изменить уровень магнитного поля в 0,9315 раза. Уменьшение тока в обмотке магнита приведет не только к уменьшению уровня среднего поля на 7 %, но и к некоторому уменьшению роста изохронного поля вдоль радиуса, что будет способствовать уменьшению дрейфа фазы пучка в зоне вывода.

Для ускорения ионов $^{84}\text{Kr}^{+12}$ на пятой кратности без изменения рабочей частоты генератора следует увеличить среднее поле в 1,118 раза. Такой режим ускорения потребует установить сдвиг фаз между дуантами 180° . Увеличение уровня магнитного поля приведет к увеличению роста среднего поля вдоль радиуса, что ухудшит фазовое движение пучка, что, в свою очередь, ставит под сомнение реалистичность данного варианта. Преимуществом режима по сравнению с предыдущим является несколько большая конечная энергия пучка 1,26 МэВ/нуклон против 1,04 МэВ/нуклон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана компьютерная модель центра циклотрона ЦИТРЕК, и проведены тестовые расчеты ускорения ионов аргона. Соответствие расчетной эффективности центра экспериментальным результатам доказывает адекватность применяемой модели. В созданной модели исследована возможность ускорения ионов криптона пониженной зарядности. По результатам анализа динамики ионов криптона в циклотроне ЦИТРЕК можно рекомендовать ускорение ионов $^{84}\text{Kr}^{+11}$, так как для этого потребуются минимальное изменение уровня магнитного поля — увеличение на 1,6 %. Также возможно ускорение ионов $^{84}\text{Kr}^{+12}$ на шестой кратности ускоряющего поля при уменьшении среднего магнитного поля на 6,8 %. В обоих случаях конечная энергия составит около 1,04 МэВ/нуклон, что достаточно для облучения пленки толщиной до 10 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аленцкий Ю. Г. и др. Разработка и создание облучательного комплекса «Альфа» для производства трековых мембран // АЭ. 2004. Т. 97, вып. 1. С. 34–40.
2. Денисов Ю. Н. и др. Режим облучения пленки ускоренными ионами аргона для производства трековых мембран // Прикладная физика. 2004. № 4. С. 100.
3. Денисов Ю. Н. и др. Физический пуск циклотрона ЦИТРЕК // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, № 3(126). С. 34–38.
4. Alenitsky Yu. G. et al. Magnetic System of the Heavy Ions Cyclotron for Track Membranes Production // Nukleonika. 2003. Suppl. 2/03. P. 342.

Получено 1 марта 2012 г.