

P9-2003-107

Ю. Н. Денисов, **В. В. Калинин**, Г. А. Карамышева

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЕНИЯ $^{40}\text{Ar}^{8+}$
В ЦИКЛОТРОНЕ ЦИТРЕК**

Направлено в «Журнал технической физики»

Введение

Циклотрон ЦИТРЕК, предназначенный для облучения полимерных пленок, используемых в производстве разделяющих и фильтрующих элементов медицинского, промышленного и бытового назначения, разработан и изготовлен в Объединённом институте ядерных исследований. Циклотрон должен ускорять тяжелые ионы 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 $^{40}\text{Ar}^{8+}$. Для проведения пусконаладочных работ были произведены численные расчёты движения ионов аргона через спиральный инфлектор, в камере ускорителя и при прохождении через выводные устройства.

Параметры циклотрона

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

Таблица 1

Ускоряемые ионы		$^{40}\text{Ar}^{8+}$
Тип ионного источника		ЭЦР
Тип инжекции		аксиальная
Рабочий вакуум	(торр)	3×10^{-7}
Уровень среднего магнитного поля	(Тл)	1.48
Количество дуантов		2
Амплитуда напряжения на дуантах	(кВ)	40
Частота ВЧ	(МГц)	18.258
Кратность ускорения		4
Начальная энергия	(МэВ/нуклон)	0.003
Конечная энергия	(МэВ/нуклон)	2.4
Начальный радиус ускорения	(мм)	53
Конечный радиус ускорения	(мм)	730
Интенсивность	(нА)	200

На *рис.1* представлен вид циклотрона в плане. На нем изображены 4 секторные шиммы S на полюсе электромагнита, два дуанта D1 и D2 высокочастотной ускоряющей системы, электростатические дефлекторы ESD1, ESD2 с угловой протяжённостью 21° и 28° и пассивный магнитный канал FD с угловой протяжённостью 17° , предназначенный для радиальной фокусировки пучка в зоне вывода.

Для циклотрона ЦИТРЕК используется источник тяжёлых ионов на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР). Энергия ионов, извлекаемых из источника, составляет 3 кэВ/нуклон. В системе инжекции предусмотрен банчер. Система инжекции включает в себя также ионопровод, анализирующий и поворотный двухсекционный магнит, элементы фокусировки и юстировки пучка.

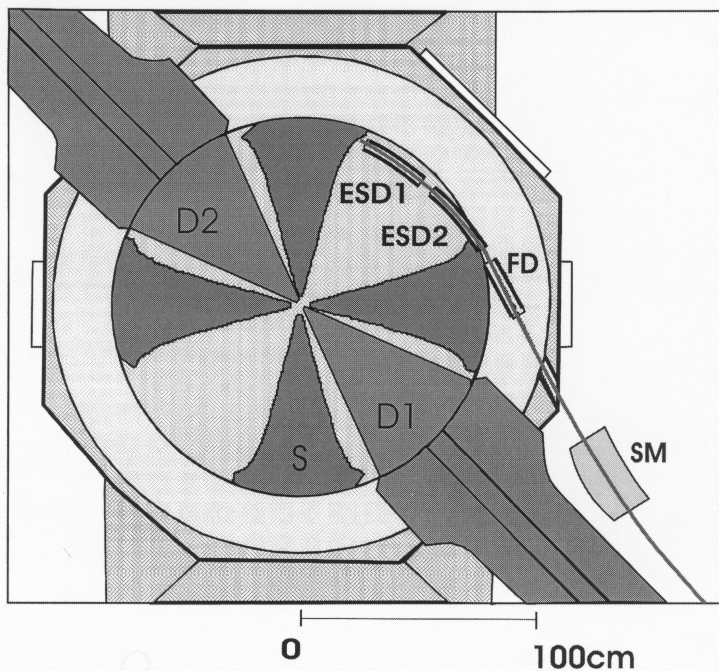


Рис. 1

Для поворота пучка ионов из вертикальной в горизонтальную плоскость циклотрона ЦИТРЕК применяется спиральный электростатический инфлектор, электрический радиус (физическая высота) которого равен 20 мм, зазор между потенциальными пластинами составляет 10 мм. Ось входа в инфлектор совпадает с вертикальной осью циклотрона.

Результаты расчётов

Согласно проекту, циклотрон должен ускорять ионы криптона с $A/Z=4,95$, для которых и формировалось изохронное поле. Однако к моменту пуска из источника были получены только ионы аргона с $A/Z=5$, поэтому возникла потребность проведения расчётов движения ионов аргона. Проектное значение амплитуды ускоряющего напряжения – 50 кВ, пусконаладочные работы осуществлялись при ускоряющем напряжении 40 кВ, поэтому все расчёты проводились для двух значений амплитуды напряжения на дуантах.

Прежде всего были произведены расчёты траектории центральной частицы в инфлекторе для ионов криптона и аргона по аналитическим формулам, описывающим траекторию в параметрической форме [1]:

$$x_c = \frac{a}{2} \left[\frac{2}{1-k^2} - \frac{\cos(k+1)\theta}{k+1} + \frac{\cos(k-1)\theta}{k-1} \right], \quad (1)$$

$$y_c = \frac{a}{2} \left[\frac{\sin(k-1)\theta}{k-1} - \frac{\cos(k+1)\theta}{k+1} \right], \quad (2)$$

$$z_c = a(1 - \sin \theta), \quad (3)$$

где a - радиус в электрическом поле (в нашем случае $a=2$ см); θ - вертикальный угол поворота, меняющийся от 0 на входе в инфлектор до $\pi/2$ на его выходе; $k=a/\rho$ - отношение электрического радиуса к магнитному. Расчёты показали, что при прочих равных условиях траектории отличаются не более, чем на 0.5 мм, очевидно, что переход на ускорение ионов аргона не будет сопровождаться увеличением потерь частиц в инфлекторе.

Далее были проведены численные расчёты ускорения 1000 ионов в циклотроне ЦИТРЕК по программе KRYC [2] в интегрированном математическом пакете MATLAB, позволяющей вычислять траектории движения ионов в динамическом режиме.

Моделирование динамики частиц осуществлялось в поле, полученном в результате последних измерений на магните циклотрона [3], в центральной области использовалась 3-мерная карта [4] электрического поля, рассчитанная для спроектированной геометрии электродов, далее, в зоне ускорения, электрическое поле аппроксимировалось аналитическими формулами [5]. В зоне вывода располагались карты полей выводных устройств [6]. Начальные поперечные эмиттансы пучка составляли $140 \mu\text{м}\times\text{мрад}$, начальная фазовая протяжённость сгустка - 20° ВЧ.

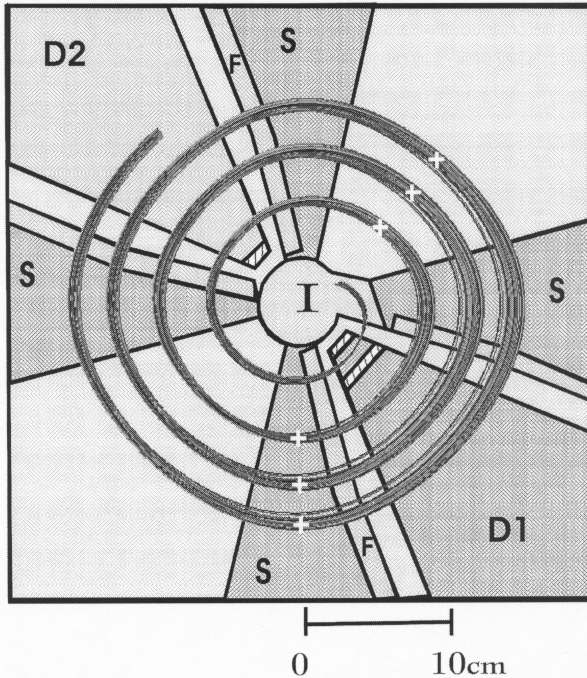


Рис. 2

На рис.2 показано движение ионов аргона в центре ускорителя (компьютерное моделирование для ускоряющего напряжения 40 кВ), представлено расположение и

структура дуантов (D1, D2) и противодуантных рамок (F), схематически изображены: корпус инфлектора (I), секторы магнита (S). Крестиками отмечены положения максимумов плотности тока пучка, измеренные дифференциальными пробниками во время пусконаладочных работ.

На *рис.3* показаны аксиальные траектории ионов, имеющих амплитуду колебаний меньше 0.9 мм (апертура дуантов равна 24 мм, однако на первом дуанте установлены две диафрагмы высотой ± 9 мм). Такую амплитуду аксиальных колебаний при ускоряющем напряжении 40 кВ имеют только 60 % всех вышедших из инфлектора частиц (из инфлектора пучок выходит расходящимся по вертикали). Таким образом, потери в центре циклотрона, обусловленные ростом амплитуды аксиальных колебаний, составляют 40%.

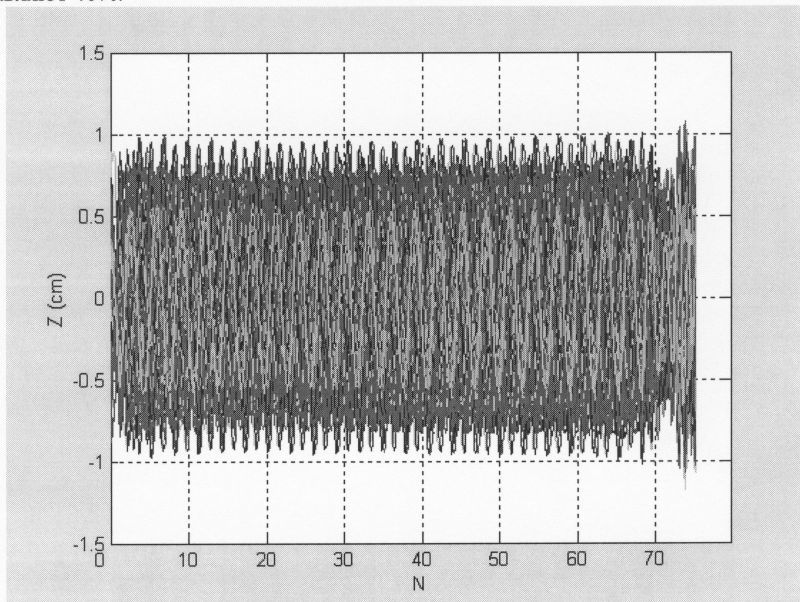
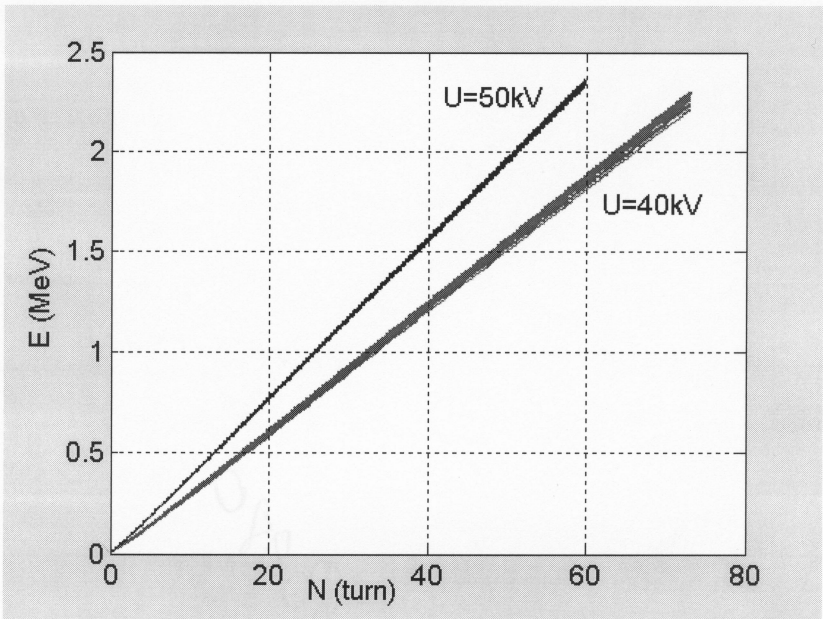


Рис. 3

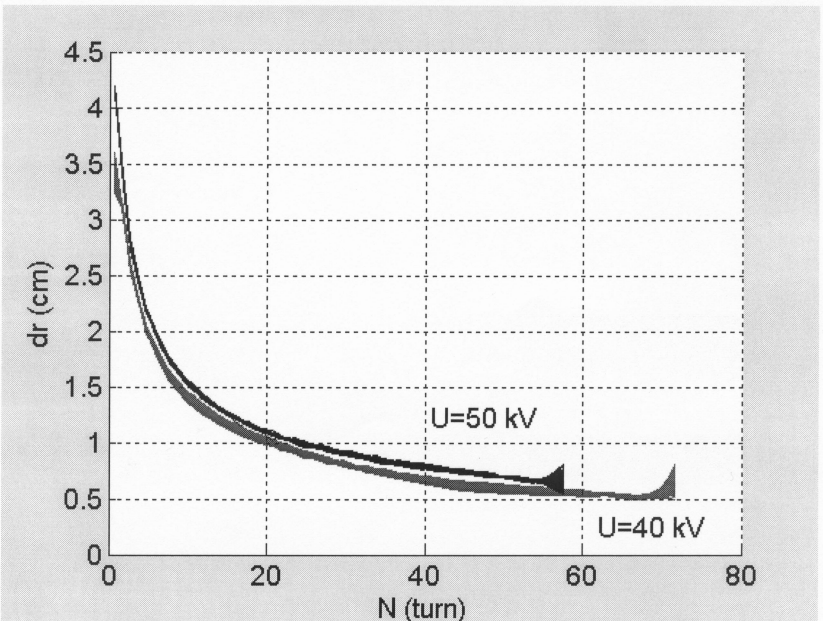
Расчёты показали, что проектной энергии 2.4 МэВ/нуклон ионы достигают на радиусе вывода 73 см за 59 оборотов при напряжении на дуантах 50 кВ и за 73 оборота при напряжении 40 кВ.

На *рис.4* показаны зависимости энергии ускоренных ионов от радиуса (напряжение на дуантах $U = 50$ кВ и 40 кВ). Видно существенное увеличение энергетического разброса при уменьшении ускоряющего поля до 40 кВ, а именно, энергетический разброс при ускоряющем напряжении 50кВ составляет $\pm 1\%$, а при 40 кВ – $\pm 2\%$. Так как энергетический разброс напрямую связан с радиальным, при уменьшении ускоряющего напряжения до 40 кВ существенно ухудшаются условия вывода.

На *рис.5* показано изменение шага орбит в зависимости от номера оборота (для каждой из ускоренных частиц). Видно, что шаг орбит в зоне вывода равен ≈ 7 мм при $U = 50$ кВ, и ≈ 5 мм при $U = 40$ кВ. Уширение графика в зоне вывода циклотрона определяется действием краевого спада поля циклотрона, приводящим к росту амплитуд радиальных колебаний.



Puc. 4



Puc. 5

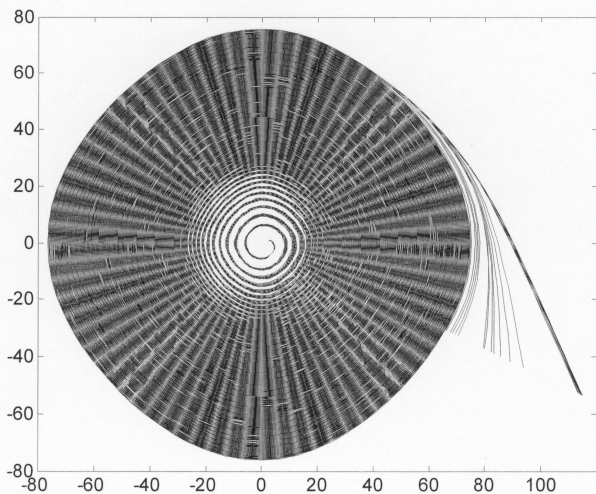


Рис. 6

На рис.6 представлены траектории частиц для всей области ускорения, включая выводные устройства при $U=40$ кВ. Видно, что разделение орбит сохраняется на протяжении 5÷10 оборотов. При $U=50$ кВ разделение орбит сохраняется на протяжении 20 оборотов. Расчёты показали, что при $U=50$ кВ процент вывода достаточно велик, а именно он составляет порядка 90% при оптимальных напряжениях на выводных устройствах. При ускоряющем напряжении $U=40$ кВ, тех же положениях выводных устройств и тех же напряжениях вывод составил порядка 20%, однако более точный подбор расположения электростатических дефлекторов и напряжений на них позволил и расчётно, и экспериментально увеличить процент вывода до 50%. Расчётный поперечный размер пучка в точке ввода в отклоняющийся магнит SM составляет $1 \times 2 \text{ см}^2$ (радиальный×вертикальный) при $U=40$ кВ и $1 \times 1,5 \text{ см}^2$ при $U=50$ кВ.

На рис.7 а,б показано фазовое движение для двух различных темпов ускорения (даны значения фаз всех частиц через каждые 5° по азимуту, белая кривая соответствует величине фазы центральной частицы в конце каждого оборота). Отклонение фазы центральной частицы не превышает $\pm 5^\circ \text{ВЧ}$ на протяжении всего цикла ускорения при амплитуде напряжения ВЧ-резонатора $U=50$ кВ и $\pm 10^\circ \text{ВЧ}$ при $U=40$ кВ.

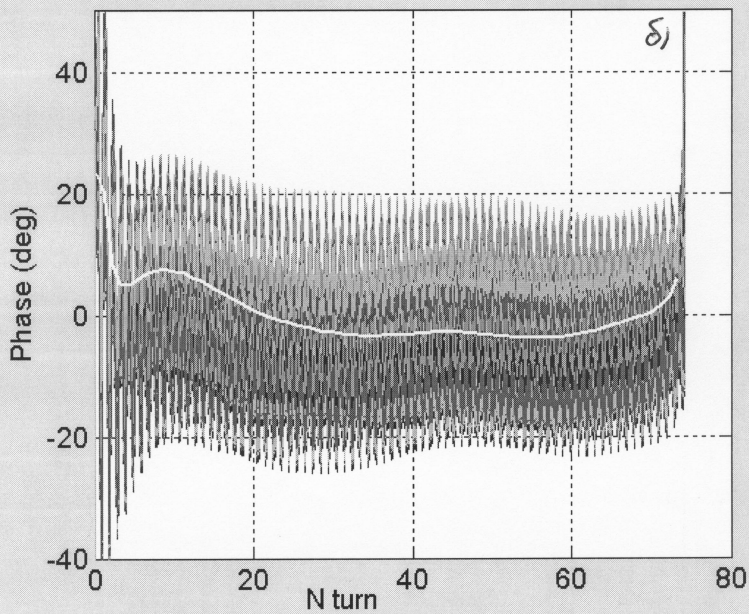
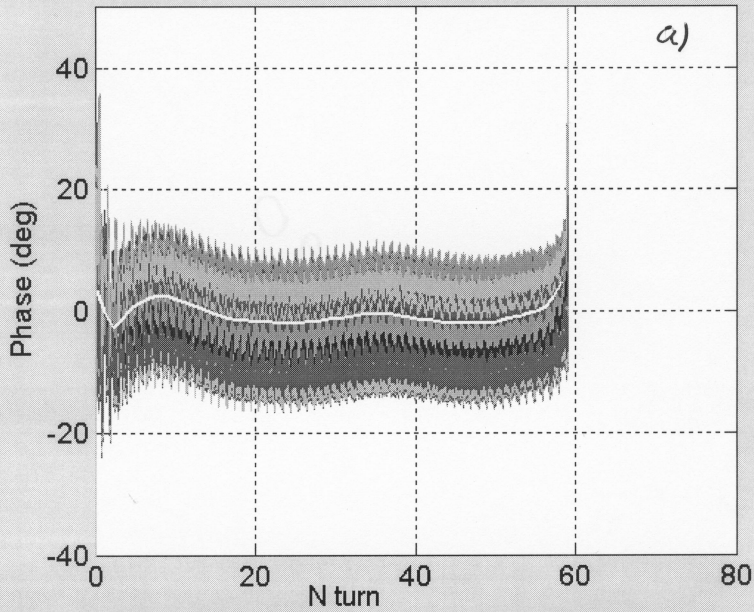


Рис. 7 а,б
7

Заключение

Таким образом, расчёты, произведённые по программе KRYC, продемонстрировали возможность ускорения и эффективного вывода ионов аргона с энергией 2.4 МэВ/нуклон в сформированном магнитном поле циклотрона ЦИТРЕК.

В августе 2002 г. в циклотроне был ускорен пучок ионов аргона при амплитуде ВЧ-напряжения 40 кВ и частоте 18.258 МГц, при этом эффективность вывода составила 50%. Проведение пусконаладочных работ циклотрона показало хорошее соответствие между расчётными и экспериментальными данными.

Авторы благодарны Казаковой Г.Г. и Лисенковой О.Е. за помощь в оформлении рукописи.

Литература

1. Mandrillon P. Injection into cyclotrons. CAS, CERN96-02, Geneva, 1996, p.153.
2. Калиниченко В.В., Карамышева Г.А. Оценка потерь ионов вследствие перезарядки на остаточном газе в камере циклотрона, Сообщение ОИЯИ Р9-2002-58, Дубна, 2002.
3. Alenitsky Yu.G. et al. Magnetic system of the heavy ions cyclotron for track membranes production, Nukleonika, Suppl. 2/03, p.342, 2003.
4. Самсонов Е.В. Шакун Н.Г. Расчёт динамики пучка для спроектированной геометрии электродов центральной области циклотрона ЦИТРЕК, внутренний отчёт, май 2000г.
5. Hazewindus N. et al. The magnetic Analogue Method as Used in the Study of a Cyclotron Central region, NIM, 118 (1974), p.125.
6. Морозов Н.А. Расчёты элементов для системы вывода циклотрона ЦИТРЕК, внутренний отчёт, июнь 1999г.

Получено 9 июня 2003 г.

Денисов Ю. Н., Калиниченко В. В., Карамышева Г. А.
Моделирование ускорения $^{40}\text{Ar}^{8+}$ в циклотроне ЦИТРЕК

P9-2003-107

Приведены основные результаты численных расчетов динамики движения ионов аргона в циклотроне ЦИТРЕК, пуск которого состоялся в августе 2002 г. Расчеты показали возможность ускорения и эффективного вывода ионов $^{40}\text{Ar}^{8+}$, экспериментальные данные полностью подтвердили представленные расчеты.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2003

Перевод авторов

Denisov Yu. N., Kalinichenko V. V., Karamysheva G. A.
Computer Modelling of $^{40}\text{Ar}^{8+}$ Acceleration in Cyclotron CYTREC

P9-2003-107

The basic results of numeric simulations of the argon ion motion in cyclotron CYTREC are presented. Computer modelling confirms the possibility of ion acceleration and effective extraction. The industrial cyclotron CYTREC built to produce the track membranes started working in September 2002, the experimental data completely support theoretical results presented.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2003

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

Подписано в печать 24.06.2003.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,68. Тираж 270 экз. Заказ № 53980.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/