

P9-2003-123

Г. Г. Гульбекян, Д. Соливайс*, О. Н. Борисов

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫВОДА ПУЧКА
ИЗ ЦИКЛОТРОНА DC-72 МЕТОДОМ ПЕРЕЗАРЯДКИ**

*Словацкий технический институт, Братислава, Словакия

1. Введение

Проектируемый циклотрон DC-72 представляет собой изохронный четырехсекторный циклотрон, ускоряющий пучки различных ионов: от H^- с максимальной энергией $W=72$ МэВ до $^{129}\text{Xe}^{18+}$ ($W=2,7$ МэВ/нукл.). Циклотрон DC-72 будет использоваться как для производства радиофармакологических препаратов, терапии глаз, так и для решения прикладных и ядерно-физических задач. Основные параметры циклотрона DC-72 представлены в таблице 1.

Таблица 1: Основные параметры циклотрона DC-72

Диаметр полюса [мм]	2600
Число секторов	4
Угловой размер сектора [град]	45
Зазор между полюсами [мм]	275
Зазор между секторами [мм]	60
Магн. поле в центре [Тл]	0,904÷1,505
Число дуантов	2
Угловой размер дуанта [град]	43
Напряжение на дуантах [кВ]	макс.60
ВЧ - частота [МГц]	18,5÷32
Номер гармоники	2÷6

Вывод пучка из вакуумной камеры будет осуществляться методом перезарядки ускоренных ионов на фольге, разработанным в ЛЯР ОИЯИ [1], в двух противоположных направлениях «А» и «В». Так как направления «А» и «В» являются симметричными, то все требования к элементам системы вывода будут относиться в дальнейшем к одному из направлений без указания названия. Численные расчеты показали, что для вывода всего диапазона ускоряемых ионов необходимо использовать по два пробника перемещения перезарядной фольги для каждого направления:

- для вывода H^- и D^- - ионов;
- для вывода $^2\text{H}^{1+}$ и тяжелых ионов.

На рис.1 приведена общая схема вывода пучка из DC-72 с выводными траекториями после перезарядной фольги для ионов H^- с энергиями 72 и 35 МэВ и тяжелых ионов с коэффициентами перезарядки $Z_2/Z_1 = 2, 0, 2, 5$ и $3, 0$ (Z_1 – заряд иона в процессе ускорения, Z_2 – заряд иона после прохождения фольги). Оси системы координат совпадают с осями симметрии секторов.

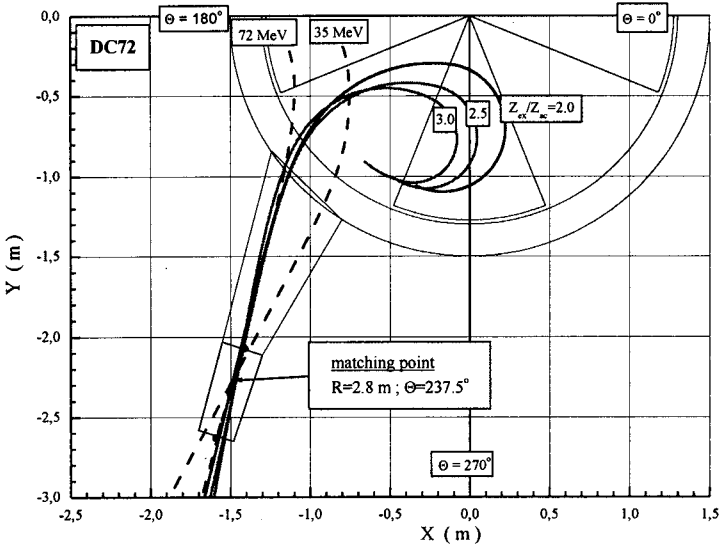


Рис. 1. Общая схема вывода из DC-72 с выводными траекториями после перезарядной фольги для ионов H^- и тяжелых ионов при коэффициентах перезарядки $Z_2/Z_1 = 2, 0, 2, 5$ и $3, 0$

2. Требования к системе вывода

Система вывода должна обеспечивать высокоэффективный вывод ускоренных пучков различных ионов в заданном направлении. В основном предполагается использовать вывод пучка за счет перезарядки ускоренных ионов на фольге, установленной вблизи конечного радиуса. Ионы H^- и D^- при прохождении перезарядной фольги теряют электроны и превращаются соответственно в H^+ и D^+ . Эффективность вывода этих ионов составляет $\approx 100\%$.

При прохождении тяжелых ионов через перезарядную фольгу их заряд изменяется с Z_1 на Z_2 , что приводит к уменьшению радиуса кривизны траектории.

При этом движение ионов из-за разности магнитных полей в холме и долине становится радиально неустойчивым, и они выводятся из вакуумной камеры циклотрона. Так как после фольги образуется спектр ионов с различными зарядами, а выводить в одну точку можно только ионы с одним зарядом, эффективность этого метода составляет $\approx 10\div 70\%$.

3. Методика расчетов

Моделирование динамики выведенного пучка из циклотрона методом перезарядки проводилось по программе "STRIPEX". Предполагалось, что ускорение как положительных, так и отрицательных ионов происходит в одном направлении против часовой стрелки.

Таблица 2. Параметры ионов, выводимых перезарядкой из циклотрона DC-72 (ΔZ и ΔX – половинные размеры пучка, **alfa** и **gamma** – макс. угловая расходимость пучка в точке пересечения)

Ускоряемые ионы	A/Z	Z ₂ /Z ₁	Энергия [МэВ/нукл.]	Коэф. вывода [%]	ΔZ [мм]	Gamma [mrad]	ΔX [мм]	Alfa [mrad]
H ⁻	1	-1	36÷72	≈ 100	6	2÷3,5	10÷30	5÷10
D ⁻	2	-1	15÷30	≈ 100	7	2÷3	10÷30	5÷10
² H ¹⁺	2	2	15÷30	≈ 100	25	7,5÷9	40	15÷30
³ He ¹⁺	3	2	7÷14	≈ 100	25	8÷10	40	25÷40
⁴ He ¹⁺	4	2	4,3÷8,6	≈ 100	25	7÷11	40	30÷40
¹⁴ N ³⁺	4,667	2,333	3,1÷6,2	70÷88	5÷10	3÷5	20÷30	10÷15
⁴⁰ Ar ⁸⁺	5	2÷2,125	2,8÷5,6	15÷40	5÷40	3÷12	25÷40	10÷40
⁴⁰ Ar ⁶⁺	6,667	2,33÷2,5	2,5÷3,2	35÷40	5	3	20÷30	10
²⁰ Ne ³⁺	6,667	3	2,5÷3,2	65÷85	5÷15	3	22	12
⁷ Li ¹⁺	7	3	2,5÷2,8	≈ 100	6	3	20÷25	12
⁸⁴ Kr ¹²⁺	7	2,08÷2,17	2,5÷2,8	25	5÷10	2÷4	15÷30	10
¹²⁹ Xe ¹⁸⁺	7,167	2÷2,06	2,5÷2,7	10	15÷50	10	10÷40	10÷25

В программе задаются параметры ускоряемого иона (A и W_{ext} – масса и конечная энергия иона, Z_1 и Z_2 – заряд иона до и после прохождения фольгой). Для заданной энергии определяется равновесная орбита ускоряемого иона, а затем вычисляется его выводная траектория после перезарядки на фольге.

Положение перезарядной фольги задается азимутом Θ_f и радиусом R_f , определяемым по равновесной орбите. Для численного моделирования системы вывода использовались характерные тестовые частицы с различными соотношениями A/Z и разными коэффициентами перезарядки Z_2/Z_1 , охватывающими весь диапазон ускоряемых ионов (таблица 2).

4. Расчет зарядовых состояний тяжелых ионов после прохождения перезарядной фольги

После прохождения ускоренных ионов через перезарядную фольгу возникает распределение по зарядам $f(Z)$ относительно эффективного заряда $Z_{\text{эфф}}$. Если энергия налетающих ионов достаточно велика, то $Z_{\text{эфф}} \gg Z_1$.

В 2001 году G. Schiwietz и P.L. Grande [2] на основе экспериментальных данных (850 точек для твердотельных мишеней) получили новое универсальное выражение для определения эффективного заряда иона для $Z_p=1\div 92$ и $Z_t=4\div 83$ (с относительной ошибкой $\Delta Z/Z_p=2,3\%$):

$$\bar{Z}/Z_p = \frac{12x + 4x^4}{(0,07/x) + 6 + 0,3x^{0,5} + 10,37x + x^4}, \quad (1)$$

где $x = (v_p/v_0 Z_p^{-0,52} Z_t^{-0,019} Z_p^{0,52} v_p/v_0 / 1,68)^{1+1,8/Z_p}$, Z – заряд иона, Z_p – порядковый номер иона, Z_t – порядковый номер материала мишени (фольги), v_p – скорость частицы (м/с), v_0 – скорость Бора ($2,19 \cdot 10^6$ м/с).

В работе [3] И.С. Дмитриев и В.С. Николаев представили оценки ширины распределений для $Z_p > 16$:

$$d = 0,5 \{ \bar{Z} [1 - (\bar{Z}/Z_p)^{0,6}] \}^{1/2}. \quad (2)$$

В первом приближении зарядовые распределения можно аппроксимировать распределением Гаусса [4]:

$$F(Z_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi d}} \exp\{-(Z_i - \bar{Z})^2 / 2d^2\}. \quad (3)$$

В качестве обдирающей фольги будет использоваться пленка из углерода толщиной 40÷60 мкг/см². Срок службы фольги определяется типом и интенсивностью пролетающих ионов, и приблизительно его можно рассчитать по эмпирической формуле:

$$T \approx 6000 \frac{W_{\text{ext}}}{Z_p^2 J}, \quad (4)$$

где W_{ext} – конечная энергия ускоренного иона [МэВ/нукл.], Z_p – порядковый номер иона, J – плотность тока [мкА/см².част.].

На циклотроне DC-72 ускоряются пучки ионов H^+ с энергиями 72÷30 МэВ и интенсивностями 35÷100 мкА. При этом время жизни фольги, рассчитанное по формуле (4), составляет ≈400÷4000 часов. Для тяжелых ионов время жизни составляет от ≈12 часов для $^{20}\text{Ne}^{3+}$ до ≈340 часов для $^2\text{H}^{1+}$. Результаты расчетов можно сравнить с измерениями на прототипе циклотрона CYCLONE 30 [5], где время жизни графитовой фольги толщиной 40 мкг/см² для протонов с энергией 30 МэВ и токами 250 и 450 мкА составляет больше 100 часов (по расчету 170 часов) и больше 24 часов (по расчету 96 часов) соответственно. Время жизни фольги для тяжелых ионов при эксплуатации на циклотроне У-400 (ЛЯР ОИЯИ), где ускоряется $^{48}\text{Ca}^{5+}$ с энергией 5,4 МэВ/нукл. при токе 10÷15 мкА составляет около 12 часов (по расчету ≈8÷12 часов).

5. Магнитные поля

Для расчетов использовались три варианта магнитных полей, полученных интерполяцией полей, измеренных на моделях циклотрона с масштабом 1:13 и 1:5.

- Модель 1:13 с плоскими секторами при трех уровнях тока 174, 284 и 400А;
- Модель 1:5 с плоскими секторами при токах 160, 240, 320, 400 и 480А, что соответствует уровням магнитных полей на конечном радиусе ускорения ($R_{ext}=111,8\text{см}$) $B_{ext}=0,847\div 1,569$ Тл.
- Модель 1:5 с шиммированными секторами для тех же значений тока.

Для последнего варианта с шиммированными секторами проводилась дополнительная коррекция магнитных полей. Поля формировались в двух радиальных зонах: $R < R_{ext}$ – зона 1 и $R > R_{ext}$ – зона 2 (рис.2).

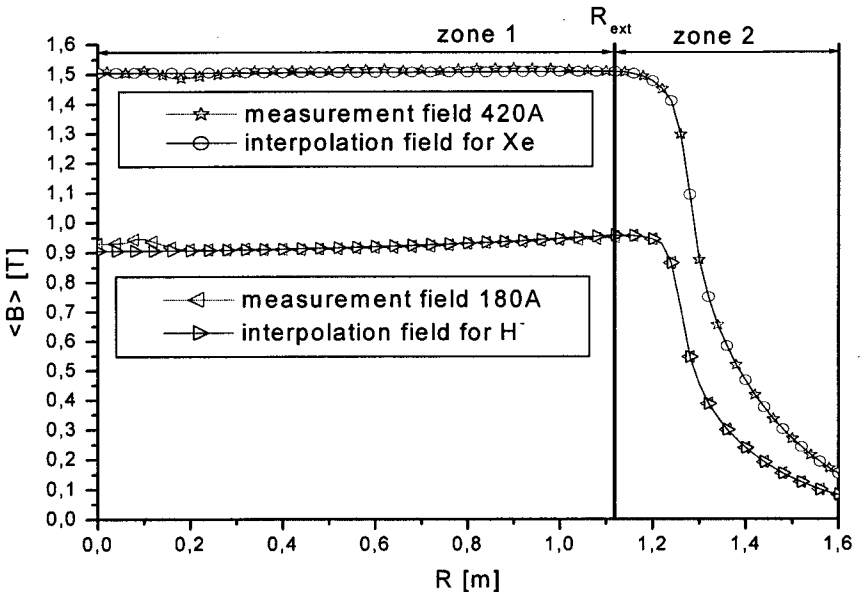


Рис. 2. Зависимость измеренного и интерполированного среднего магнитного поля вдоль радиуса.

Для заданной конечной энергии W_{ext} вычислялось соответствующее среднее магнитное поле на конечном радиусе R_{ext} [6]:

$$B(R_{ext}) = \frac{Acamu}{ZeR_{ext}} \sqrt{\left(\frac{10^6 eW_{ext}}{Ac^2 amu} + 1\right)^2 - 1}, \quad (5)$$

где A – масса ускоряемого иона, Z – заряд ускоряемого иона, R_{ext} – конечный радиус ускорения ($R_{ext}=1,118$ м), W_{ext} – конечная энергия ускоренного иона [МэВ], amu – атомная единица массы ($amu=1,660538730 \cdot 10^{-27}$ кг).

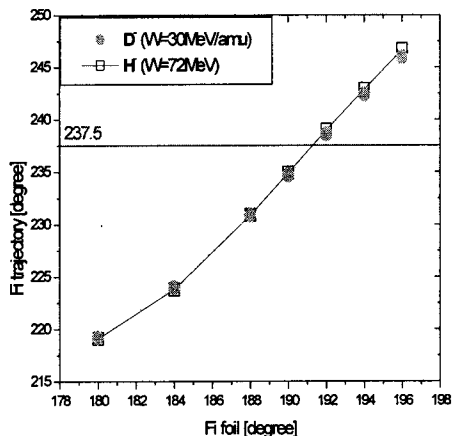
Зависимость краевых магнитных полей вдоль радиуса (зона 2) получалась интерполяцией измеренных краевых полей при условии $B(R_{ext})=B_{ext}$.

Технические ограничения модели (отсутствие необходимого количества корректирующих катушек) не позволяли получать требуемые изохронные зависимости среднего магнитного поля вдоль радиуса. В связи с этим в зоне 1 магнитные поля моделировались следующим образом. Для заданного B_{ext} и A/Z вычислялось среднее магнитное поле вдоль радиуса $B(r)$ с учетом изохронизма для соответствующего иона. Азимутальное распределение магнитного поля на каждом радиусе соответствовало измерениям, но нормировалось в соответствии с требуемой величиной среднего магнитного поля.

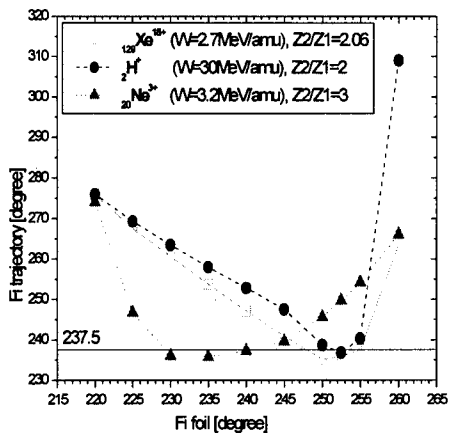
6. Выбор направления пучка

Система вывода должна обеспечивать вывод пучков различных ионов в требуемом диапазоне энергий в заданном направлении. Для обеспечения вывода всех ионов с параметрами из таблицы 2 был выбран однооборотный вывод пучка из вакуумной камеры циклотрона. Траектории всех выводимых ионов должны иметь общую точку пересечения. Если исходить из конструкции ускорителя и его расположения в экспериментальном зале, то эта точка должна находиться на радиусе ≈ 280 см. Для определения азимутального положения точки были проведены исследования по влиянию азимутального положения фольги на направление вывода пучка. На рисунках 3а и 3б показана величина азимута, на котором ионы достигают радиуса 280 см, в зависимости от азимутального

положения фольги. Полученные результаты показали возможность сведения траекторий для всех рассматриваемых тестовых частиц в общую пространственную точку с координатами $R=280\text{см}$ и $\Theta=237,5^\circ$ ($X=-1,5\text{м}$, $Y=-2,35\text{м}$).



a)



б)

Рис.3. Зависимость азимута, на котором траектория достигает радиуса 280см, от азимута положения перезарядной фольги (а – для ионов H^- и D^- , б – для ${}^2\text{H}^{1+}$ и тяжелых ионов).

7. Огибающие выведенных пучков

Для исследования динамики выведенного пучка необходимо оценить радиальный ε_r и аксиальный ε_z эмиттансы пучка после прохождения перезарядной фольги, а также энергетический разброс δW . Аксиальный размер пучка ΔZ после прохождения перезарядной фольги практически не изменяется, а радиальный размер ΔR определяется максимальным забросом пучка на фольгу [7]:

$$\Delta Z = 2A_z, \quad (6)$$

$$\Delta R = \Delta R_w + \Delta R_p, \quad (7)$$

где $\Delta R_W \approx \frac{R_{ext} \Delta W}{2W_{ext}}$ – радиальный шаг орбиты за счет набора энергии,

$\Delta R_P \approx 2\pi A_R (Q_R - 1)$ – радиальный шаг орбиты за счет прецессии, R_{ext} – радиус вывода, W_{ext} – конечная энергия иона, ΔW – набор энергии за оборот, $A_{R,Z}$ – амплитуды радиальных и аксиальных колебаний, $Q_{R,Z}$ – частоты колебаний.

Предполагается, что величина разброса радиальных и аксиальных импульсов практически не меняется при прохождении перезарядной фольги:

$$\Delta P_{R,Z} = \frac{A_{R,Z} Q_{R,Z}}{R_{ext}}. \quad (8)$$

При выводе с помощью перезарядки энергетический разброс в пучке после фольги δW определяется в основном тем, что заброс на перезарядную фольгу происходит в течение нескольких оборотов и, соответственно, с разной энергией.

Величину δW приблизительно можно оценить как

$$\delta W \approx \frac{2A_R}{\Delta R} \frac{\Delta W}{W_{ext}}. \quad (9)$$

Дополнительный энергетический разброс возникает из-за взаимодействия ионов с материалом перезарядной фольги. Эта величина при толщине фольги $40 \div 60$ мкг/см² не превышает 0,1% [8], что заметно меньше разброса энергии из-за многооборотного заброса пучка на фольгу.

Для оценки качества выведенного пучка проводились расчеты огибающих и эмиттансов в точке пересечения при следующих начальных условиях: радиальный эмиттанс после перезарядной фольги $(5 \div 15)\pi$ мм.мрад, аксиальный эмиттанс $(8 \div 13)\pi$ мм.мрад, разброс энергии $\pm 1\%$.

Использование метода перезарядки для вывода позволяет изменять энергию выводимого пучка за счет перемещения перезарядной фольги как по радиусу, так и по азимуту. Для определения требуемого радиального и азимутального положения перезарядной фольги был проведен ряд расчетов с использованием характерных тестовых частиц с различными соотношениями A/Z и разными коэффициентами перезарядки Z_2/Z_1 , охватывающими весь диапазон ускоряемых

ионов (таблица 2). Требуемые зоны перемещения перезарядной фольги отображены на рисунке 4.

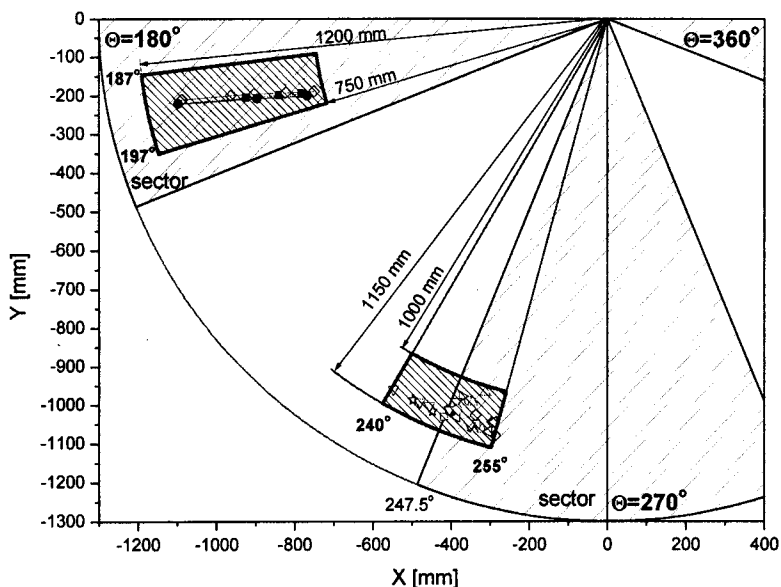


Рис.4. Зоны перемещения пробников перезарядной фольги для пучков H^- и D^- , и для ${}^2H^{1+}$ и тяжелых ионов.

8. Корректировка направления движения пучка

Как видно из рис.1, выводимые траектории сходятся в общую точку, но имеют различные направления. Углы вылета выведенных пучков по отношению к оси сектора ($\Theta = 270^\circ$) для различных ионов составляют от 9° до 28° . Согласование выводных траекторий с системой транспортировки осуществляется при помощи корректирующего магнита, изменяющего направления вылета пучков после магнита до 18° по отношению к оси сектора.

9. Результаты

Анализ полученных результатов позволяет сказать, что пучки H^- и D^- можно выводить из вакуумной камеры циклотрона в точку пересечения с нужными энергиями. Диапазон перемещения перезарядной фольги при различных вариантах магнитных полей практически не изменяется и составляет $\approx 10^\circ$ по азимуту ($187 \div 197^\circ$) и ≈ 450 мм по радиусу ($R=750 \div 1200$ мм). Пучки выводятся с хорошим качеством для всего диапазона энергий (полные размеры пучков в точке пересечения менее 50 мм в обоих направлениях).

При первых расчетах вывода тяжелых ионов (с использованием полей, измеренных на модели 1:13) диапазон перемещения фольги составлял $\approx 30^\circ$ по азимуту ($230 \div 260^\circ$). При использовании полей, измеренных на модели циклотрона 1:5 с плоскими секторами, диапазон перемещения фольги уменьшился до $\approx 20^\circ$ ($235 \div 255^\circ$). А при использовании полей, измеренных на модели циклотрона 1:5 с шиммированными секторами, удалось уменьшить диапазон перемещения фольги до $\approx 15^\circ$ ($240 \div 255^\circ$). Граница сектор–долина находится на азимуте $247,5^\circ$.

Пучки тяжелых ионов ${}^7\text{Li}^{1+}$, ${}^{20}\text{Ne}^{3+}$, ${}^{40}\text{Ar}^{6+}$, ${}^{14}\text{N}^{3+}$ и ${}^{84}\text{Kr}^{12+}$ с коэффициентом перезарядки 2,1÷3 имеют полные размеры в точке пересечения менее 50 мм в обоих направлениях.

У тяжелых ионов ${}^2\text{H}^{1+}$, ${}^3\text{He}^{1+}$, ${}^4\text{He}^{1+}$, ${}^{40}\text{Ar}^{8+}$, ${}^{129}\text{Xe}^{18+}$ с коэффициентом перезарядки, близким к 2, и выводимых в точку пересечения с конечного радиуса получаются большие размеры пучка (приблизительно 150 мм) в горизонтальном направлении. Это вызвано прохождением пучка вблизи границы сектор–долина, где имеются большие градиенты магнитных полей. Поэтому для этих пучков был сделан дополнительный анализ вывода с изменением радиуса и азимута положения фольги и с рассмотрением распределения частиц в пучке. Расчеты показали, что с уменьшением радиуса положения фольги улучшаются размеры пучка, поэтому необходимо снизить радиус вывода. На самом высоком уровне магнитного поля ($B_0=1,505$ Тл) возможно снизить радиус вывода до 107 см, а для меньших уровней полей – до 100 см (при плоских секторах до 95 см). После

рассмотрения распределения частиц в пучке можно сказать, что 60÷80 процентов частиц содержится в ядре пучка ($\Delta X=40$ мм). При сравнении результатов можно отметить, что при шиммированных секторах по сравнению с плоскими секторами горизонтальные размеры пучка увеличились, а вертикальные – уменьшились.

В дальнейшем, после конечного измерения реальных магнитных полей на реальном магните, необходимо провести дополнительные оценки конечных размеров пучков в точке пересечения.

Литература

- [1] **Оганесян Ю.Ц.** и др., Вывод тяжелых ионов из секторно-фокусирующих циклотронов методом перезарядки, Препринт Объединного института ядерных исследований, 9-11993, Дубна, 1978
- [2] **G. Schiwietz, P.L. Grande**, Nucl.Instr. and Methods B (2001) Vol.175-177 p.125
- [3] **Y. Baudinet-Robinet**, Nucl.Instr. and Methods (1981) Vol.190 p.197-202
- [4] **Н. К. Скобелев**, Ионизация тяжелых ионов и продуктов ядерных реакций в различных средах, Физика элементарных частиц и атомного ядра (1989) том 20, вып.6, стр.1456
- [5] **J.-L. Bol et al.**, Operational experience with a high intensity, 30 MeV, H⁻ cyclotron for radioisotope production, Труды XI всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1989, с.155
- [6] **J. Livingood**, Principles of cyclic particle accelerators, 1961, p.307
- [7] **W. Joho**, Extraction from medium and high energy cyclotron. Proc. of the 5th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Oxford, 1969, p.159
- [8] **E. Baron and Ch. Ricaud**, Beam foil interaction studies for the future stripper of GANIL, EPAC-88, Rome, 1988, v.2, p.839

Получено 30 июня 2003 г.

Гульбежян Г. Г., Соливайс Д., Борисов О. Н.
Численное моделирование вывода пучка
из циклотрона DC-72 методом перезарядки

P9-2003-123

Представлены результаты численного моделирования вывода пучка методом перезарядки из циклотрона DC-72. Выполнены расчеты для тестовых ионов с разными соотношениями $A/Z=1+7,2$ и коэффициентами перезарядки $Z_2/Z_1=2+3$. Выбрано положение перезарядной фольги для однооборотного вывода.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2003

Перевод авторов

Gulbekyan G. G., Solivajs D., Borisov O. N.
Numerical Simulation of the Ion Beam Extraction
from DC-72 Cyclotron by Stripping Foil

P9-2003-123

The results of numerical simulation of the beam extraction by stripping foil from the DC-72 cyclotron are presented. The calculations for test ions with different $A/Z=1+7.2$ and $Z_2/Z_1=2+3$ are carried out. The positions of the stripping foil for single-turn extraction are chosen.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

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

Редактор *Е. К. Аксенова*
Макет *Е. В. Сабаяевой*

Подписано в печать 08.07.2003.
Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 0,88. Уч.-изд. л. 0,81. Тираж 280 экз. Заказ № 54004.

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/