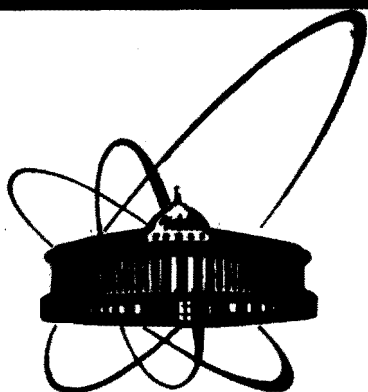




**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

9-86-785

**Г.Г.Гульбекян, Б.А.Кленин, А.М.Мордуев,
Р.Ц.Оганесян, К.Хавличек, В.А.Чугреев**

**ПОЛУЧЕНИЕ ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКОВ
НА ЦИКЛИЧЕСКОМ ИМПЛАНТАТОРЕ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ИЦ-100**

1986

В настоящее время на циклическом имплантаторе тяжелых ионов ИЦ-100 осуществлено ускорение ионов до энергии ~ 1 МэВ/нуклон в диапазоне $A/Z = 5,33 \div 6,00$ (A — масса иона, Z — заряд иона) от $^{12}\text{C}^{+2}$ до $^{40}\text{Ar}^{+7}$ с интенсивностями внутренних пучков $7,5 \cdot 10^{13} \div 1 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$.

Вывод ионов из циклотрона осуществлен двумя способами: с помощью электростатического дефлектора и методом обдирки на углеродной фольге. Схема вывода представлена на рис. 1. Численное моделирование вывода пучка осуществлялось на ЭВМ путем решения уравнений движения ионов ^[2] в реальном магнитном поле методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Радиальное распределение магнитного поля ИЦ-100 за конечным радиусом ускорения показано на рис. 2.

Дефлектор, конструкция которого представлена на рис. 3, с угловой протяженностью 28° и радиальной апертурой 10 мм расположен в доли-

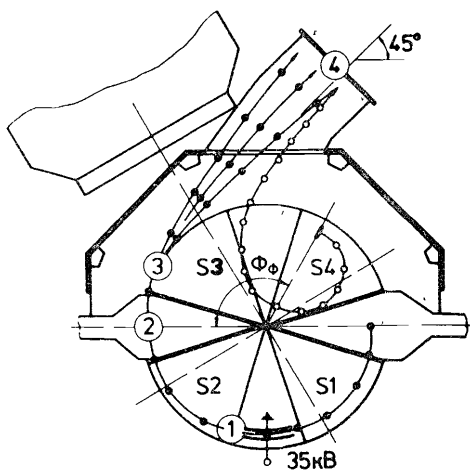


Рис. 1. Схема вывода ионов из циклотрона ИЦ-100.

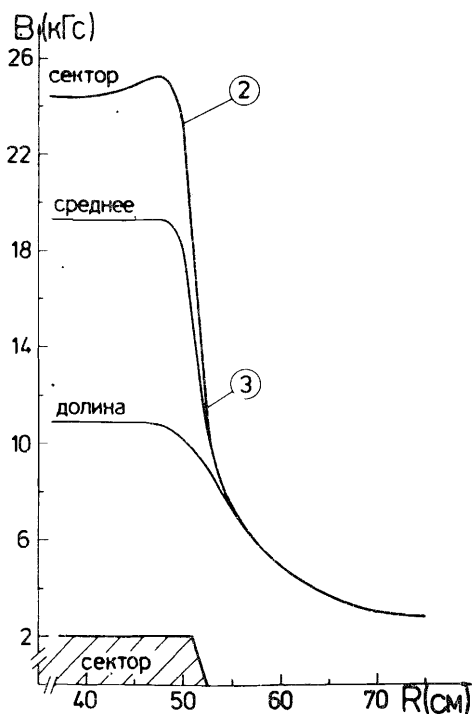


Рис. 2. Радиальное распределение рассеянного магнитного поля.

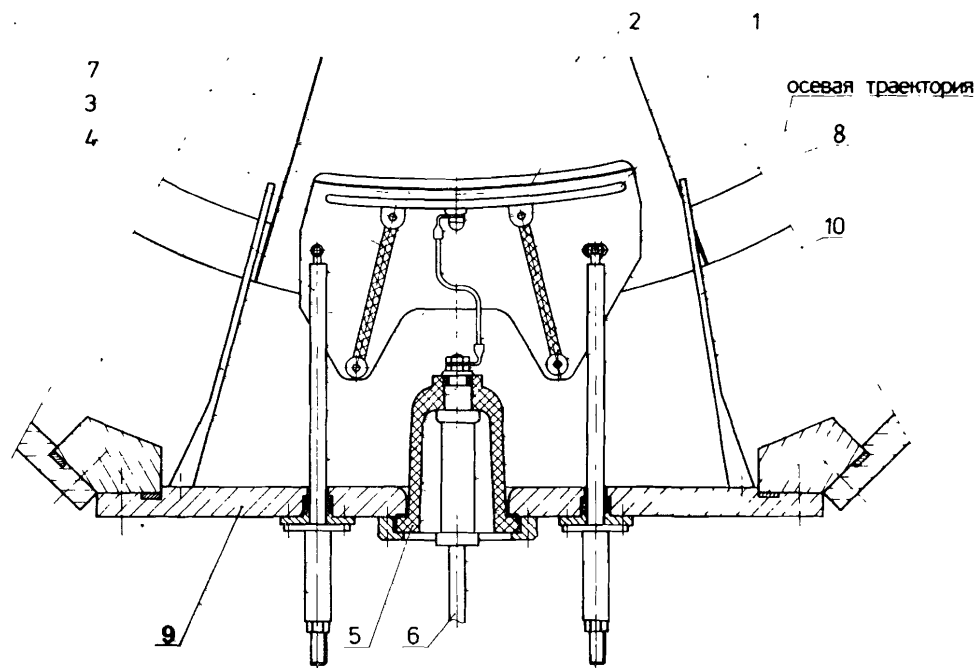


Рис. 3. Конструкция электростатического дефлектора: 1 — потенциальная пластина, 2 — заземленная пластина, 3 — несущий изолятор, 4 — шток перемещения выхода дефлектора, 5 — изолятор ввода отклоняющего напряжения, 6 — высоковольтный ввод, 7, 8 — сектора, 9 — фланец камеры циклотрона, 10 — входной экран.

не циклотрона, ось которой перпендикулярна оси резонансной системы. Вертикальный профиль потенциальной и заземленной пластин выбран плоским, а их радиальная кривизна соответствует кривизне центральной траектории пучка ионов в дефлекторе. Вследствие малой угловой протяженности дефлектора кривизна его пластин в горизонтальной плоскости с достаточной точностью описывается дугами окружностей радиусами $(\rho_0 + 5)$ мм и $(\rho_0 - 5)$ мм, где ρ_0 — радиус осевой траектории ионов в дефлекторе. Потенциальная и заземленная пластины выполнены из листовой меди толщиной 5 и 1,5 мм соответственно, высота потенциальной пластины составляет 35 мм. Минимальный возможный радиус установки дефлектора — 425 мм, диапазон перемещения по радиусу — 150 мм. Вследствие малой рассеиваемой мощности водяное охлаждение дефлектора отсутствует. Вся конструкция смонтирована на фланце вакуумной камеры, что позволяет оперативно извлекать дефлектор для осмотра и ревизии.

В качестве источника высокого потенциала использована выпрямительная установка ВС-50-50. Ее основные технические параметры:

Пределы регулирования выпрямленного напряжения	0÷50 кВ
Номинальный ток нагрузки	50 мА
Точность плавной регулировки (от макс. напряжения)	1 %
Пульсация выпрямленного напряжения	± 5 %

Оптимальное напряжение дефлектора при настройке на максимальную интенсивность в плоскости облучения находится в пределах $(30 \div 35)$ кВ. При этом ток утечки составляет величину $(0,5 \div 1,5)$ мА. Для коррекции положения орбиты пучка на входе в дефлектор в противоположной от него долине установлена пара азимутальных корректирующих катушек. Каждая катушка состоит из 256 витков медного провода, намотанного на охлаждаемый водой медный каркас. Для питания катушек использован стабилизированный источник ($\Delta I/I = 10^{-5}$) с максимальным током 15 А при номинальном напряжении 15 В. Оптимизация вывода с помощью азимутальных катушек повысила интенсивность пучка, проведенного через дефлектор, на $(15 \div 20)$ %. Вся интенсивность отклоненного пучка, измеренная на выходе из дефлектора (точка 1 на рис. 1), укладывается в круг диаметром ~8 мм. Эффективность прохождения пучка через дефлектор составила величину ~70%.

В ряде прикладных задач, в том числе при производстве ядерных фильтров, требуется облучение пучком тяжелых ионов широких (до нескольких десятков сантиметров) мишеней. Для этой цели обычно применяют довольно сложные и громоздкие системы сканирования пучком [3, 4]. В нашем случае было решено использовать иной способ.

Как видно из рис. 1 и 2, после дефлектора пучок проходит расстояние между точками 2 и 3 в рассеянном магнитном поле циклотрона с высокими радиальными градиентами ~50 Т/м. Проходя в таком поле, пучок испытывает сильное радиально-дефокусирующее воздействие. На рис. 4 представлено радиальное распределение интенсивности отклоненного пучка в точке 3 (см. рис. 1) для различных величин отклоняющего напряжения. В этом месте пучок уже имеет горизонтальный размер $(30 \div 50)$ мм, а в плоскости облучения (точка 4), на расстоянии 0,5 м от выводного фланца камеры циклотрона, его горизонтальный размер превышает 300 мм. При этом вертикальный размер пучка остается в пределах 10 мм.

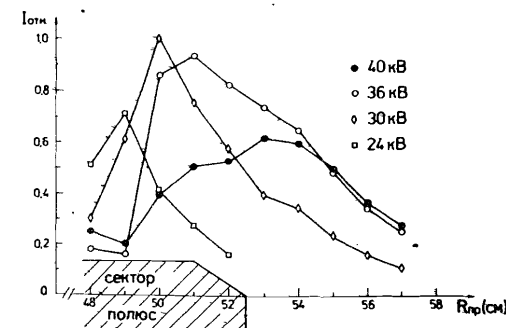


Рис. 4. Радиальное распределение интенсивности отклоненного пучка в точке 3 (см. рис. 1) для ряда отклоняющих напряжений на дефлекторе.

Проведенные измерения показали, что ионы, имеющие в точке 3 (см. рис. 1) радиальную координату $R > 53,5$ см, не попадают в выводной патрубок, что, естественно, снижает эффективность вывода. Введение в отклоненный пучок тонкой углеродной фольги привело к довороту части пучка в выводной патрубке вследствие ее обдирки и уменьшения радиуса кривизны траектории. При этом интенсивность пучка в плоскости облучения увеличилась на $(15 \div 20)\%$ и составила величину $\sim 50\%$ от интенсивности внутреннего пучка циклотрона.

На циклическом имплантаторе исследована также возможность и осуществлен вывод ионов методом обдирки на тонкой углеродной мишени. Для расчета его параметров была использована программа, написанная для исследования вывода ионов из циклотрона У-400. Методика расчета подробно описана в работе ^{/5/}.

Вывод методом обдирки из циклотрона ИЦ-100 имеет особенности, налагающие ограничения на начальные условия. Таковыми являются:

- малая энергия ионов и, как следствие, малые коэффициенты обдирки (коэффициент обдирки $q = Z_2/Z_1$, где Z_1 и Z_2 — заряд иона до и после обдирки; как известно, в основном зависит от энергии иона, а также материала и толщины обдирочной мишени ^{/6/}),
- малый радиус вывода,
- малая угловая протяженность долины (34°),
- малый вертикальный зазор между секторами (20 мм).

Дополнительным ограничением на начальные условия явилось то, что наклон траектории выведенного пучка к выводному фланцу вакуумной камеры желательно было получить $\sim 45^\circ$, что соответствует наклону траектории пучка ионов, выведенных с помощью электростатического дефлектора, то есть использовать тот же канал вывода.

Математическое моделирование вывода методом обдирки из ИЦ-100, с учетом указанных особенностей и ограничений, показало, что ионы с коэффициентом обдирки $q < 1,85$ вследствие относительно большого радиуса кривизны траектории в данном магнитном поле "гибнут" в центральной области циклотрона на ионном источнике.

Для $q > 1,85$ на выводной фланец попадают траектории ионов, у которых азимутальное положение обдирочной фольги $112^\circ \leq \phi_\phi \leq 119^\circ$ (угол ϕ_ϕ отсчитывается от оси резонансной системы по часовой стрелке, см. рис. 1). Вместе с тем при $\phi_\phi < 117^\circ$ траектории ободранных ионов пересекают границу сектора S_3 в двух точках, причем углы входа и выхода из сектора являются фокусирующими в радиальном и дефокусирующими в аксиальном направлении. Это приводит к значительному увеличению аксиального размера пучка в секторе и к его потере. Таким образом, возможный рабочий диапазон положений обдирочной фольги оказывается в пределах $117^\circ \leq \phi_\phi \leq 119^\circ$. Как видно из рис. 1, наклон выведенной траектории к плоскости выводного фланца для $\phi_\phi = 117^\circ$ составляет угол $\sim 45^\circ$. Это положение обдирочной фольги было выбрано в качестве рабочего.

Оценки некоторых параметров обдирочной мишени, а также параметров пучка ободранных ионов по формулам, приведенным в работе ^{/7/}, дают следующие результаты. Равновесная толщина углеродной мишени

$$X \text{ мкг/см}^2 = 5,9 + 22,4 \cdot W - 1,13 \cdot W^2,$$

где W — энергия налетающего иона в МэВ/нуклон. Для ионов с энергией ~ 1 МэВ/нуклон эта толщина равна ~ 30 мкг/см². Среднеквадратичный угол рассеяния при этом составит величину $\theta_{1/2} \sim 1,2$ мрад, а энергетический разброс ионов $\delta W/W$ в пучке после обдирки увеличится на 0,08%.

Время жизни углеродной фольги под пучком самых тяжелых из диапазона ускоренных ионов $^{40}\text{Ar}^{+7}$ согласно формуле

$$T_{\text{ж}} \approx 6 \cdot 10^3 \frac{W}{Z_0^2 \cdot j},$$

где W — энергия налетающего иона в МэВ/нуклон, Z_0 — заряд ядра иона, j — плотность пучка на мишени, р.мкА/см², при энергии 1,15 МэВ/нуклон и плотности пучка на мишени ~ 1 р.мкА/см² составило величину около 20 часов, что приблизительно соответствует времени жизни ионного источника.

В таблице приведены параметры обдирки ионов из диапазона ускоренных на ИЦ-100, где A — масса иона, Z_1 — заряд иона до обдирки, Z_2 — равновесный заряд иона после обдирки, W — энергия налетающего иона, K — содержание ионов данной зарядности в пучке после обдирки.

Таблица

Ион	A/Z_1	W МэВ	W/A МэВ/н	Z_2	$K \%$
$^{12}\text{C}^{+2}$	6,00	13,4	1,1	+4	15
				+5	70
				+6	15
$^{16}\text{O}^{+3}$	5,33	19,5	1,2	+5	5
				+6	45
				+7	45
				+8	5
$^{22}\text{Ne}^{+4}$	5,50	26,9	1,2	+7	22
				+8	50
				+9	22
$^{40}\text{Ar}^{+7}$	5,71	46,3	1,1	+12	25
				+13	25
				+14	15
				+15	4

Сечение выведенного пучка на расстоянии 0,5 м от плоскости выводного фланца (точка 4 на рис. 1) вписывается в круг диаметром 30 мм, что вполне пригодно для его использования или дальнейшей транспортировки. Эффективность вывода для каждого сорта ионов соответствует коэффициенту K , указанному в таблице.

Авторы выражают искреннюю благодарность академику Г.Н.Флеорову за постоянный интерес и внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болтушкин В.В. и др. ОИЯИ, 9-86-305, Дубна, 1986.
2. Басаргин Ю.Г., Литиновский Р.Н. В кн.: Электрофизическая аппаратура. Атомиздат, М., 1966, вып. 5, с.135.
3. Флеров Г.Н., Кузнецов В.И. В кн.: Труды Международной школы молодых ученых по проблемам ускорителей заряженных частиц. ОИЯИ, Д9-84-817, Дубна, 1984, с.3.
4. Люк Х.Б. и др. В кн.: Совещание по использованию ядерных фильтров для решения научно-технических и народнохозяйственных задач и радиационному материаловедению. ОИЯИ, Р18-86-110, Дубна, 1986, с.37.
5. Гульбекян Г.Г., Мордуев А.М. ОИЯИ, 9-84-480, Дубна, 1984.
6. Baron E. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1979, vol. NS-26.
7. Erb W. GSI-P-7-78, Darmstadt, October, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 декабря 1986 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги,
если они не были заказаны ранее.

Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
Д3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
Д11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к.
Д10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.
Д13-85-793	Труды XП Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна 1985.	4 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований