

0-361

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

940 / 2-79

11 993



19/III-79

9- 11993

Ю.Ц.Оганесян, С.И.Козлов, Г.Г.Гульбекян,
Б.А.Кленин

ВЫВОД ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
ИЗ СЕКТОРНО-ФОКУСИРУЮЩИХ ЦИКЛОТРОНОВ
МЕТОДОМ ПЕРЕЗАРЯДКИ

1978

9- 11993

Ю.Ц.Оганесян, С.И.Козлов, Г.Г.Гульбемян,
Б.А.Кленин

ВЫВОД ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
ИЗ СЕКТОРНО-ФОКУСИРУЮЩИХ ЦИКЛОТРОНОВ
МЕТОДОМ ПЕРЕЗАРЯДКИ

*Направлено на Совещание по изохронным циклотронам
/Краков, ПНР/*

Оганесян Ю.Ц. и др.

9 - 11993

Вывод тяжелых ионов из секторно-фокусирующих циклотронов методом перезарядки

В работе приводятся теоретические и экспериментальные результаты исследований по выводу тяжелых ионов методом перезарядки из циклотронов ОИЯИ У-200 и У-400. Рассматривался как однооборотный, так и двухоборотный вывод ионов. Исследования показали, что двухоборотный вывод более эффективен, чем однооборотный. Здесь достигается увеличение эффективности вывода и пространственного разделения между пучками ионов разных зарядов. Это позволяет осуществить вывод двух пучков ионов, от ионов Ne до ионов Xe, ускоренных на У-400, с высокой эффективностью, достигающей 100-40% соответственно. Кроме того, имеется возможность плавного регулирования энергии выведенных ионов в пределах 35%.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Oganessian Yu.Tz. et al.

9- 11993

Extraction of Heavy Ions from Sector Focusing Cyclotron by the Recharge Method

Results of theoretical and experimental investigations on the extraction of heavy ion beams from the U-200 and U-400 cyclotrons by the recharge methods are presented. Both one-circulation and two-circulation extractions of ions are considered. It was shown that the two-circulation extraction is more effective as compared to the one-circulation extraction. It provides increasing in extraction efficiency coefficient and in space separation between beams of different charge ions. This allows one to extract two ion beams of Ne to Xe accelerated on the U-400 cyclotron, with the efficiency as high as 100-40%, respectively. Besides, there is a possibility to regulate smoothly the energy of ions extracted within 35%.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna 1978

В настоящее время в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ завершается сооружение четырехметрового изохронного циклотрона тяжелых ионов У-400. Циклотрон позволяет ускорять ионы в широком диапазоне отношений $A/Z = 4 \div 25$ до энергий $35 \div 1$ МэВ/нуклон соответственно. Вывод пучков из У-400 будет осуществляться методом перезарядки их на тонкой мишени.

МЕТОД ВЫВОДА И ЕГО ОСОБЕННОСТИ

Метод вывода ионов перезарядкой был предложен группой сотрудников Лаборатории ядерных реакций в 1964 г.^{1/}, а в 1970 г. он был реализован на двухметровом изохронном циклотроне У-200^{2/}. Сущность его состоит в том, что ионы с зарядом Z_1 , ускоренные до конечного радиуса R_K секторного циклотрона, проходят затем через тонкую мишень, повышая свой заряд до Z_2 . После перезарядки радиус кривизны их траекторий резко уменьшается. Движение ионов из-за разности магнитных полей в "холме" и "долине" становится радиально неустойчивым, и ионы выводятся из вакуумной камеры ускорителя. В зависимости от отношений зарядов Z_1/Z_2 , радиального и азимутального положения перезарядной мишени пучок ионов может выйти из камеры циклотрона, совершив один либо два и более оборотов в магнитном поле ускорителя после перезарядки. Принципиальная схема вывода ионов представлена на рис. 1.

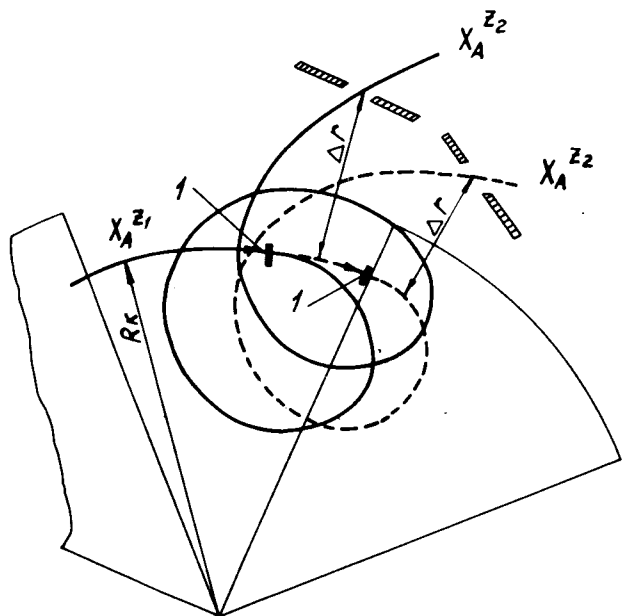


Рис. 1. Схема вывода ионов методом перезарядки. — — — — — двухоборотный вывод, - - - - - однооборотный вывод, 1 - перезарядная мишень.

ОДНООБОРОТНЫЙ И ДВУХОБОРОТНЫЙ ВЫВОДЫ ПУЧКОВ ИОНОВ

При столкновении ионов с атомами перезарядной мишени они будут иметь распределение по зарядам $f(z)$ относительно максимального эффективного заряда Z_{eff} . Если энергия налетающих ионов достаточно велика, то $Z_{eff} \gg Z_1$. Характерные распределения по зарядам, например, для ионов Ne и Xe, имеющих энергию 6-6,5 МэВ/нуклон, приведены на рис. 2. Видно, что если для ионов неона максимальная эффективность вывода составляет ~70% /100% для более легких/, то для ксенона она около 20%. Однако наряду с зарядом Z_{eff} после прохождения пучком мишени образуются группы ионов с зарядами $Z_{eff} \pm 1$, $Z_{eff} \pm 2$, не сильно отличающиеся

по интенсивности от группы ионов с равновесным зарядом /см. рис. 2/. Поэтому для повышения эффективности вывода ионов перезарядкой имеется возможность одновременного выпуска двух-трех пучков ионов разных зарядов. Основная трудность реализации вывода нескольких пучков связана с их пространственным разделением. В этой связи в лаборатории были проведены теоретические и экспериментальные исследования по выводу двух-трех пучков после одного /3/, а также двух оборотов ионов, прошедших перезарядное устройство.

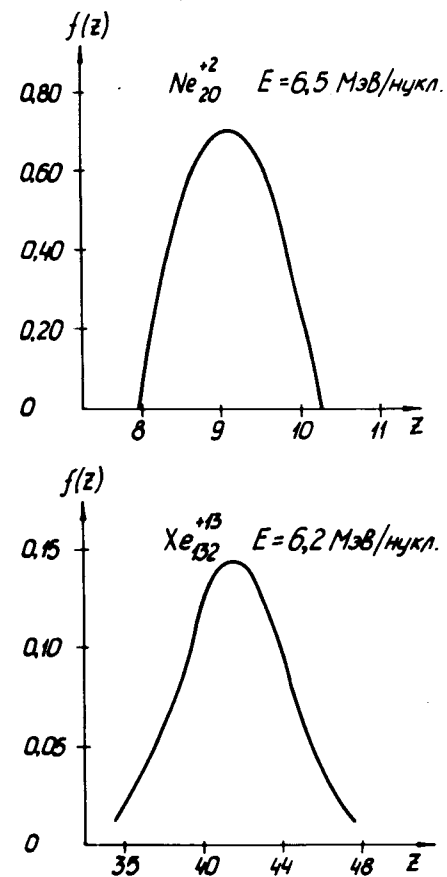


Рис. 2. Распределение ионов Ne и Xe по зарядам после прохождения перезаряжающей мишени.

1. Пространственное разделение выводимых пучков ионов разных зарядов

Теоретический анализ вывода пучков ионов проводился на основе численного решения уравнений движения заряженной частицы в реальных магнитных полях циклотронов У-200 и У-400. В векторной форме уравнение

$$\frac{d}{dt} (Am \vec{v}) = \frac{Ze}{C} [\vec{v} \times \vec{H}], \quad /1/$$

где Am , Ze - масса и заряд иона соответственно; \vec{v} - скорость иона; \vec{H} - магнитное поле; C - скорость света. Уравнение /1/ решалось на ЭВМ в полярной системе координат для медианной плоскости циклотрона. Для этой цели была разработана программа "STRIP", использующая метод решения Рунге-Кутты. Составляю-

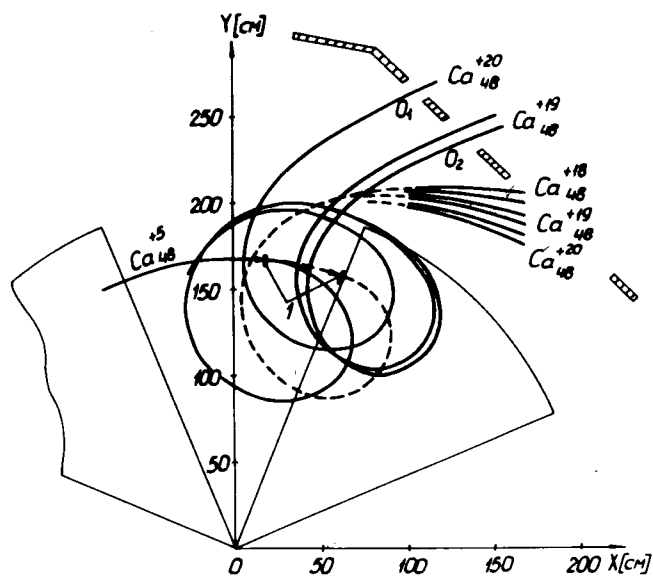


Рис. 3. Вывод пучков ионов Ca_{48} с конечного радиуса циклотрона У-400. - - - - однооборотный вывод, ———— двухоборотный вывод, 1 - перезарядная мишень.

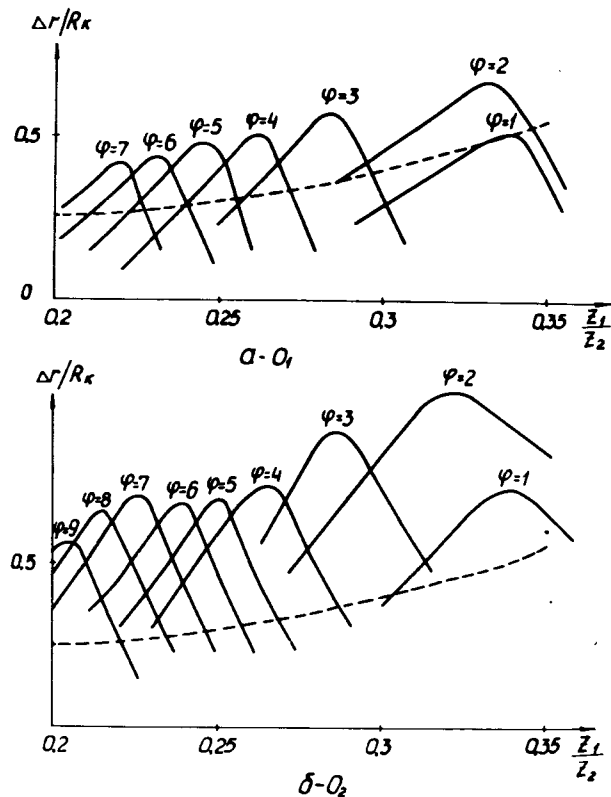


Рис. 4. Зависимость относительного заброса $\Delta r/R_k$ ионов от отношения зарядов Z_1/Z_2 и азимутального положения ϕ мишени для У-400. $\phi = 1$ - середина долины; $\phi = 9 - 15^\circ$ - от середины долины по ходу пучка; $\Delta\phi = 1,875^\circ$; а - выводное окно O_1 , δ - выводное окно O_2 /рис. 3/; - - - - вывод с одним оборотом; ———— - вывод с двумя оборотами.

щие координат (r, ϕ) и скоростей (v_r, v_ϕ) в начальной точке интегрирования соответствовали их значениям на равновесной орбите радиуса вывода, вычисляемой по методике, изложенной в работах ^{4,5}. Шаг интегрирования выбирался постоянным. В данной работе были выполнены расчеты центральных траекторий ионов и, кроме того, изучалось изменение радиального эмиттansa

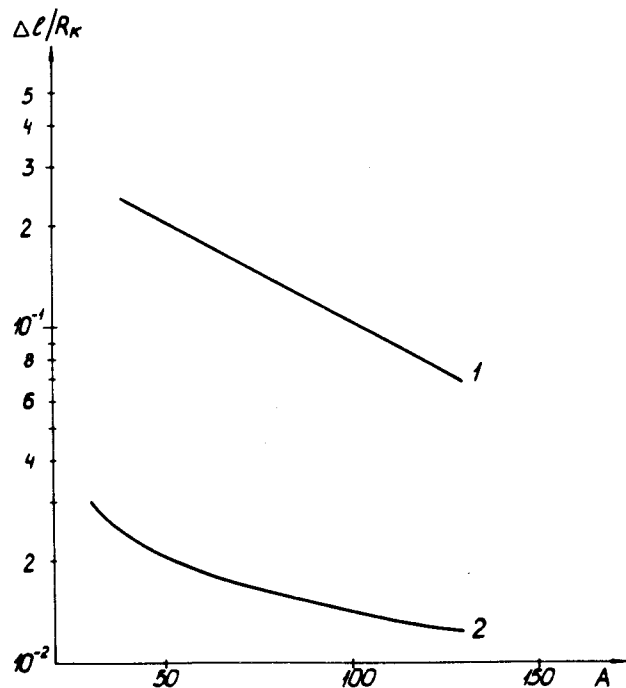


Рис. 5. Относительное расстояние $\Delta l/R_{\kappa}$ между выведенными пучками разных зарядов ($Z \pm 1$) в зависимости от массы для циклотрона У-400. 1 - двухоборотный вывод, 2 - однооборотный вывод.

✓ пучка / $\epsilon_r = 20$ мм мрад/ в процессе вывода, который на конечном радиусе ускорения задавался в виде параллелограмма /совокупность 9 точек/ в радиальном фазовом пространстве (r, r').

Результаты численного моделирования вывода ионов перезарядкой из циклотрона У-400 представлены на рис. 3-5. На рис. 3 приведены траектории ионов Ca_{48} , выводимых из циклотрона У-400 как после одного, так и после двух оборотов. Видно, что при двухоборотном выводе ионов Ca_{48} заброс пучков $\Delta r/R_{\kappa}$ и радиальное расстояние между пучками разных зарядов, отличающихся на единицу, существенно больше, чем при однооборотном выводе тех же ионов. Заброс измерялся

по радиусу, соединяющему центр циклотрона и центр выводного окна /см. рис. 1/.

На рис. 4 представлена зависимость радиального заброса ионов от отношения зарядов Z_1/Z_2 и азимутального положения фольги ϕ . Положение фольги ϕ на равновесной орбите вывода изменялось от середины "долины" ($\phi=1$) до угла, равного 15° ($\phi=9$), с шагом $\Delta\phi=1,875^\circ$. При выводе ионов с одним оборотом фольга располагалась на границе "холм-долина". При таком положении перезарядного устройства достигалась максимальная величина заброса пучка. Из рис. 4 видно, что при двухоборотном выводе имеется сильная зависимость заброса пучка $\Delta r/R_{\kappa}$ как от отношения зарядов Z_1/Z_2 , так и от азимутального положения перезарядного устройства. Это обуславливает более жесткие требования к точности установки фольги, чем при однооборотном выводе ионов.

Рис. 5 показывает расстояние между центральными траекториями выводимых пучков разных зарядов, отличающихся на единицу, в зависимости от их массы. Видно, что расстояние между пучками при двухоборотном выводе на порядок выше, чем при однооборотном.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДВУХОБОРОТНОГО ВЫВОДА ИОНОВ

Эксперименты по двухоборотному выводу ионов перезарядкой проводились на циклотроне У-200. Ионы N_{14}^{+2} ускорялись на четвертой гармонике в/ч напряжения. Вывод ионов осуществлялся с равновесной орбиты, имеющей средний радиус 74 см. Энергия выводимых ионов составляла 2,14 МэВ/нуклон. Распределение по зарядам ионов азота после прохождения их с этой энергией через тонкую углеродную фольгу /толщиной ~ 40 мкг/см²/ таково, что образуется две группы ионов: N_{14}^{+6} и N_{14}^{+7} .

Расчетные траектории выведенных ионов представлены на рис. 6. Азимутальное положение фольги на радиусе вывода выбрано так, чтобы ионы N_{14}^{+7} попадали в выводное окно циклотрона. Измеренные распределения

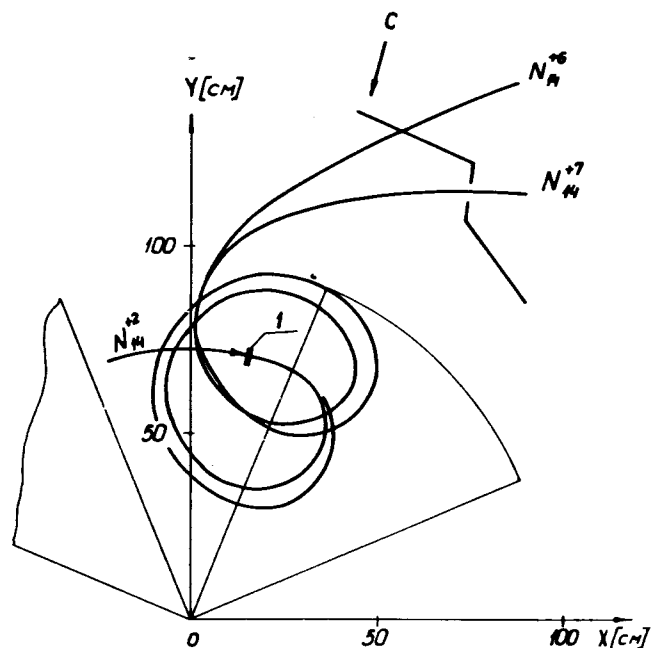


Рис. 6. Вывод пучков N_{14} из циклотрона У-200. 1 - перезарядная мишень.

интенсивностей пучков ионов N_{14}^{+6} и N_{14}^{+7} приведены на рис. 7. Из рисунка видно, что расстояние между центрами двух пучков /по направлению "С", рис. 6/ составляет 21 см, что хорошо согласуется с расчетным значением. Радиальная полуширина пучка ионов N_{14}^{+7} составила ~4 см, а пучка ионов N_{14}^{+6} ~7 см. Разница полуширин обусловлена тем, что ионы N_{14}^{+6} на первом обороте после прохождения фольги попадают в область сектора с большим радиальным градиентом магнитного поля. Это приводит к дефокусировке пучка по радиусу. Отметим, что при однооборотном выводе ионов из изо-хронного циклотрона У-200 ^[2] радиальная полуширина пучков /без фокусирующего канала/ в районе выводного окна составляет 3-4 см.

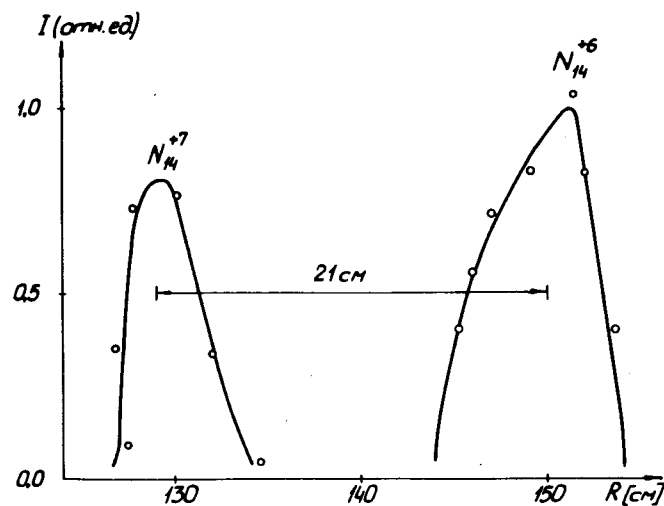


Рис. 7. Радиальное распределение пучков ионов N_{14}^{+7} и N_{14}^{+6} , выведенных из циклотрона У-200.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКОВ ИОНОВ

Регулирование энергии ионов при помощи перемещения выводной фольги впервые осуществлено в лаборатории в 1977 г. на циклотроне У-200 ^[6]. Диапазон отношений A/Z ионов, ускоряемых на циклотроне, составляет 2,8-5. Однако однооборотный вывод перезарядкой, а следовательно, и регулирование энергии возможны только для ионов с $A/Z \geq 3,8$ ^[2].

На рис. 8 представлена зависимость углового положения выводной мишени от радиуса вывода R , полученная путем расчета траекторий ионов. Для перемещения выводной фольги по заданному закону $R = f(\alpha)$ было выполнено простое устройство, которое управлялось дистанционно без нарушения вакуума. Было установлено, что для более точного совмещения выведенных пучков с осью ионпровода необходимо в небольших пределах

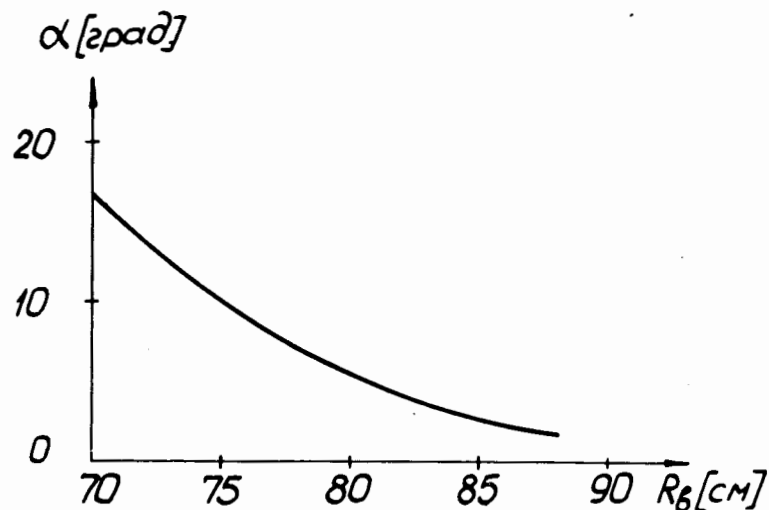


Рис. 8. Зависимость углового положения α перезарядной мишени от радиуса вывода R_g для циклотрона У-200.

корректировать угол подхода пучка к мишени, используя токовые азимутальные катушки циклотрона.

Диапазон варьирования энергии лежит в пределах 35%, что составляет, например, для ионов C_{12}^{+3} 76÷112 МэВ, а для ионов He_4^{+1} - 24÷37 МэВ. Интенсивность выведенных пучков ионов при варьировании энергии меняется незначительно и составляет ~20 мкА для ионов C_{12}^{+3} и ~50 мкА для ионов He_4^{+1} . Следует отметить, что перестройка циклотрона У-200 с одной энергии на другую занимает всего несколько минут.

Реализованный на циклотроне У-200 способ вывода и регулирования энергии ионов будет использоваться на четырехметровом изохронном циклотроне У-400. Этот метод позволит выводить все ускоренные ионы основного диапазона от ионов Ne до ионов Xe и регулировать их энергию в пределах 15÷35%.

ПЕРЕЗАРЯДНАЯ МИШЕНЬ

Толщина слоя углеродной мишени, после прохождения которого устанавливается равновесное распределение ио-

нов по зарядам, для ионов с энергией ~10 МэВ/нуклон составляет 40÷60 мкг/см² [7].

Оценки показывают, что изменения эмиттанса пучка из-за многократного рассеяния частиц в мишени незначительны.

Относительные средние потери энергии частиц в мишени также невелики, однако они существенно влияют на температурный режим фольги, поскольку мощность рассеивается только путем излучения. При перезарядке импульсного пучка, как показывают расчеты [8], наблюдаются значительные колебания температуры мишени, что является одним из факторов, влияющих на срок ее службы.

К другому возможному механизму, приводящему к разрушению фольги, можно отнести механические напряжения, возникающие в фольге из-за ее локального разогрева [8].

Опыт эксплуатации циклотрона У-200 и тандем-циклотронов ЛЯРа [9] показывает, что срок службы мишени при перезарядке легких ионов (He ÷ Ne) с энергией ~10 МэВ/нуклон составляет десятки часов, тяжелых, таких, как Kr, Xe /1 МэВ/нуклон/, - 5÷10 часов.

На циклотроне У-400 конечная энергия ускоренных пучков ионов Kr, Xe составит ~7 МэВ/нуклон, что приведет к снижению потерь энергии частиц в мишени при перезарядке. Однако значительное увеличение интенсивности пучков этих ионов создаст напряженный режим работы перезарядной мишени.

Для быстрой смены поврежденных фольг для циклотрона У-400 разработан кассетный механизм, перемещаемый дистанционно по радиусу и азимуту и шлюзуемый без нарушения вакуума циклотрона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические и экспериментальные исследования вывода пучков методом перезарядки из секторно-фокусирующих циклотронов Лаборатории ядерных реакций показали широкие возможности этого метода.

Простота данного способа вывода сочетается с его высокой эффективностью. Так, для широкого диапазона $A/Z = 4 \div 10$ коэффициент вывода составит $/100 \div 40/\%$.

Применение двухоборотного метода вывода позволит получить два пространственно разделенных пучка, что расширит экспериментальные возможности ускорителя.

Наряду с глубоким регулированием энергии пучка ионов с помощью перестройки основных параметров циклотрона /магнитного поля ускорителя, частоты ускоряющего напряжения, токов корректирующих катушек/ метод вывода перезарядкой позволяет плавно варьировать энергию в пределах 35% только соответствующим изменением радиального и азимутального положения перезарядного устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вялов Г.Н., Оганесян Ю.Ц., Флеров Г.Н. ОИЯИ, 1884, Дубна, 1964.
2. Шелаев И.А. и др. ПТЭ, 1970, №3, с. 53.
3. Клеинин Б.А., Козлов С.И., Фикс М.М. ОИЯИ, 9-10652, Дубна, 1977.
4. Басаргин Ю.Г., Литуновский Р.Н. В сб.: Электрофизическая аппаратура, вып. 3, Атомиздат, М., 1965, с.3.
5. Шелаев И.А., Козлов С.И., Клеинин Б.А. ОИЯИ, Р9-5033, Дубна, 1970.
6. Гульбекий Г.Г., Евдокимов А.К., Козлов С.И. ОИЯИ, 9-10990, Дубна, 1977.
7. Grodzins L. e.a. Phys.Lett., 1967, 24B, p.282.
8. Armitage B.H. e.a. Daresbury, DL/NSF/P76, 1978.
9. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-6062, Дубна, 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 октября 1978 года.