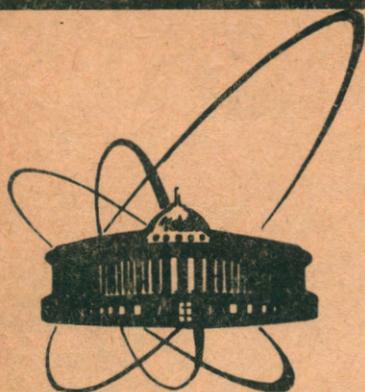


89-215

Дубна



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

К 484

P9-89-215

Б. А. Кленин, С. И. Козлов

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫВОДА ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
НА ЦИКЛОТРОННОМ КОМПЛЕКСЕ ЛЯР У-400 -
У-400М

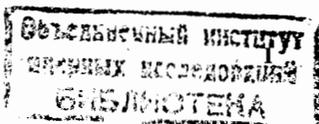
1989

Создаваемый в настоящее время в ЛЯР ОИЯИ циклотронный комплекс У-400 - У-400М^{1,2/} предназначен для получения ускоренных пучков ионов элементов практически всей таблицы Д.И. Менделеева с энергией $15 + 120$ МэВ/нуклон. Изохронный циклотрон У-400^{3/} используется в этом случае в качестве инжектора пучков тяжелых ионов с $A/Z \approx 20 + 25$ и энергией $1 + 2$ МэВ/нуклон. Вывод частиц из камеры ускорителя в отличие от применяемого сейчас метода выпуска частиц - перезарядкой на тонкой мишени^{4/} должен производиться без изменения заряда иона - электростатическим дефлектором в сочетании с фокусирующим пассивным магнитным каналом.

Численное моделирование процесса вывода ионов осуществлялось по схеме: определение конечной равновесной орбиты иона с выбранным отношением A/Z , получение осевой траектории отклоненного в требуемом направлении пучка частиц и величины напряженности электрического поля дефлектора, прослеживание эволюции фазовой области (r, r'), занимаемой пучком в процессе вывода, при варьировании гиперболичности дефлектора, положения и градиента фокусирующего в радиальном направлении магнитного канала с целью получения сфокусированного пучка на выходе из камеры ускорителя.

Система вывода частиц из циклотрона У-400 (рис. 1) включает 38° -электростатический дефлектор с плоскими электродами и зазором между ними 10 мм, максимальным потенциалом до 50 кВ, а также трехэлементный радиально-фокусирующий магнитный канал с градиентом до 1,5 кГс/см. Благодаря большому (~ 9 мм) приросту радиуса частицы за оборот ожидаемая эффективность вывода пучков ионов составит около 70%.

Далее пучки ионов транспортируются по галерее, связывающей залы ускорителей У-400 и У-400М (рис. 2) и инжектируются



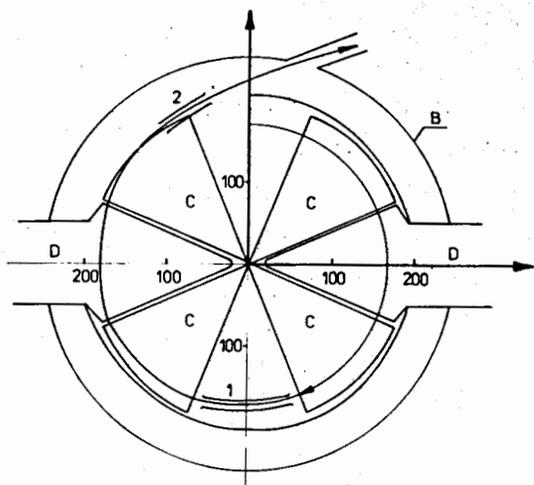


Рис. 1. Схема вывода ионов из циклотрона У-400.

1 - дефлектор, 2 - магнитный фокусирующий канал,
C - секторы, D - дуанты, B - вакуумная камера.

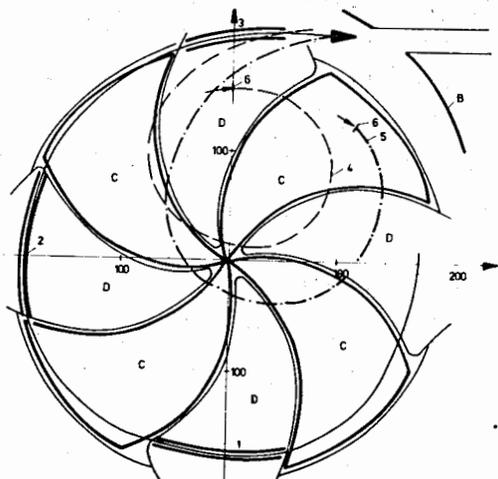


Рис. 2. Схема вывода ионов из циклотрона У-400М.

1 и 2 - электростатические дефлекторы, 3 - магнитный
фокусирующий канал, C - секторы, D - дуанты, B - вакуум-
ная камера. Вывод перезарядкой. 4 - $\text{He}_4^{+1} \rightarrow \text{He}_4^{+2}$,
5 - $\text{H}_2^+ \rightarrow 2p + \bar{e}$, 6 - перезарядная мишень.

на перезарядную мишень, проходя которую, увеличивают свой заряд
в 3 + 4 раза.

Ускорение ионов в изохронном циклотроне У-400М предпола-
гается осуществить четырьмя дуантами, размещаемыми в долинах цик-
лотрона, с набором энергии иона с зарядом Z за оборот около
 $0,6 \cdot Z$ (МэВ) при использовании второй гармоники высокочастотного
напряжения. При этом прирост радиуса за оборот Δr самой энер-
гичной частицы (~ 120 МэВ/нуклон) составит $\sim 2,5$ мм, что, по-ви-
димому, не вызывает проблем с эффективным обходом септума
электростатического дефлектора ($\eta \approx 1 - \frac{\delta}{\Delta r}$), где $\delta \approx 0,3$ мм -
толщина септума.

Магнитная фокусирующая структура изохронного циклотрона
У-400М^{5/} состоит из четырех секторов угловой протяженности 45°
и углом спиральности на конечном радиусе ускорения 40° . Парамет-
ры магнитных полей циклотрона У-400М, полученные из магнитных
измерений по модели электромагнита ускорителя, выполненной в
масштабе 1:2,92, представлены на рис. 3. Форма распределений
среднего магнитного поля на конечных радиусах ускорения частиц
с $A/Z = 2$ и 5 заметно отличается и потому будет скорректирова-
на токовой системой.

Численное моделирование процесса вывода частиц из У-400М
показало на необходимость использования двух электростатических
дефлекторов и одного радиально-фокусирующего магнитного канала,
устанавливаемых во внутренней полости дуантов циклотрона (рис. 4).
Необходимая величина напряженности электрического поля дефлекто-
ров для вывода частиц с $A/Z = 2$ ($W_k = 120$ МэВ/нуклон), как
показали расчеты, составляет 100 - 120 кВ/см. Для устойчивой
работы дефлекторов, определяемой условием $V \cdot E \leq (1,5:2) \cdot 10^4$ кВ²/см,
зазор между электродами дефлекторов выбран равным 5 мм
(рис. 5). Первый по ходу пучка электростатический дефлектор име-
ет электроды с гиперболичностью $q = 0,05$, $E = E_0(1 - q \frac{r}{a})$,
 Δr - отклонение пучка от осевой траектории, второй - плоские. Гра-

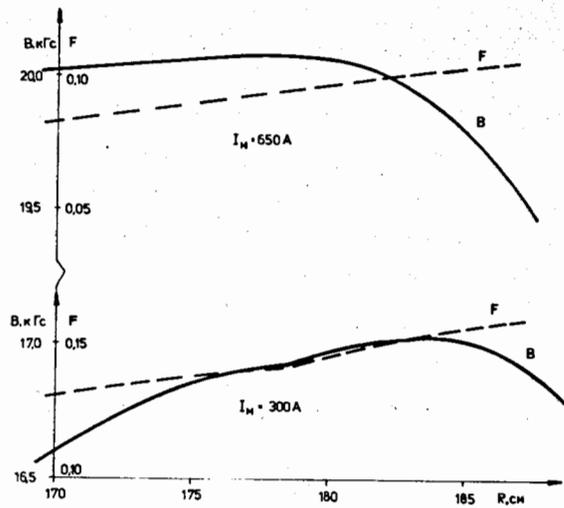


Рис. 3. Распределение среднего магнитного поля (B) и флаттера (F) на конечных радиусах модели электромагнита У-400М для двух токов возбуждения.

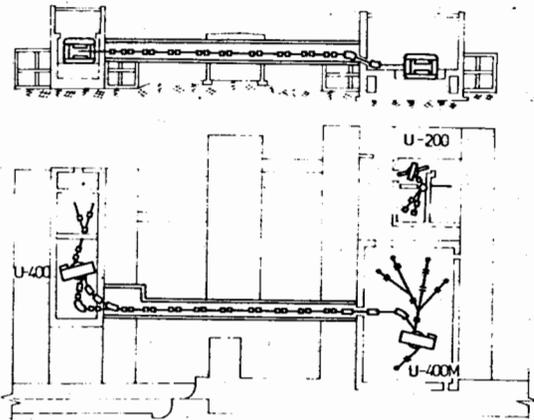


Рис. 4. Схема циклотронного комплекса тяжелых ионов.

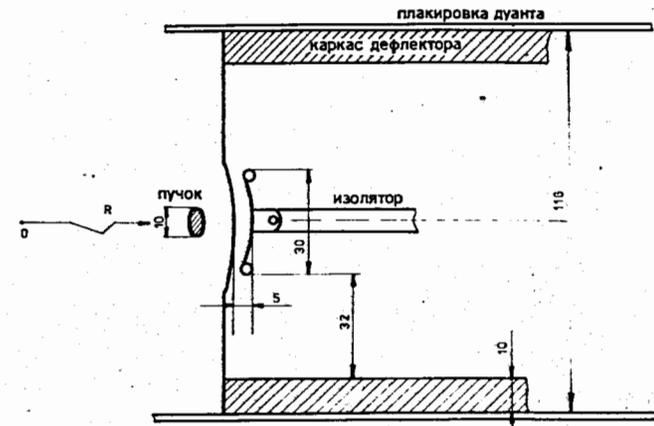


Рис. 5. Схема электростатического дефлектора У-400М, установленного в дуанте.

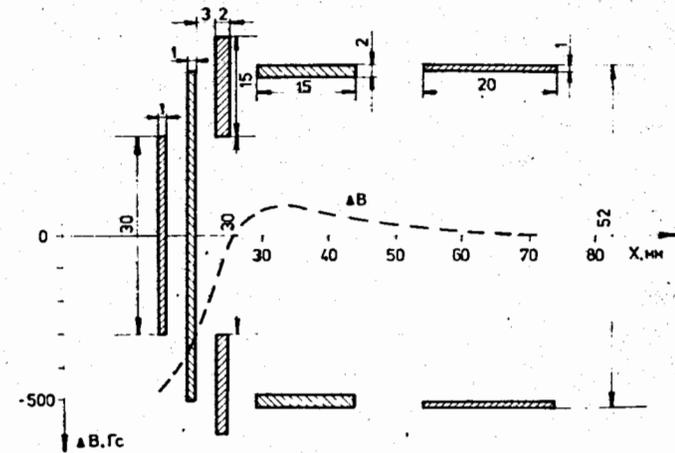


Рис. 6. Элементы магнитоэлектростатического дефлектора У-400М и распределение его магнитного поля.

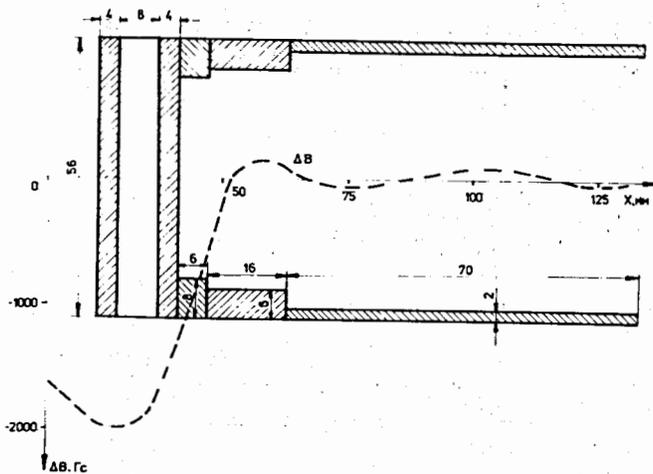


Рис. 7. Магнитный компенсирующий канал и распределение его магнитного поля.

диент магнитного поля пассивного магнитного фокусирующего канала, устанавливаемого в третьем дуанте, составляет величину ~ 1 кГс/см.

С целью возможного снижения требуемой и достаточно высокой (~ 120 кВ/см) напряженности электрического поля дефлекторов циклотрона У-400М проведен анализ магнитоэлектростатического дефлектора, электроды которого выполнены из тонкого железа, плакированного медью. Снижение магнитного поля на оси такого дефлектора, образованного двумя тонкими железными пластинами при энергии ионов 120 МэВ/нуклон ($\beta = 0,46$), позволяет уменьшить требуемую напряженность электрического поля на величину ΔE (В/см) $\approx 140 \Delta B$ (Гс). Результаты расчетов распределения магнитного поля, проведенных при условии равномерного намагничивания элементов, составляющих канал, приведены на рис. 6. Возмущения магнитного поля циклотрона на конечных радиусах ускорения частиц компенсируются железными шиммами и, в дополнение, токовыми корректирующими катушками.

Второй по ходу пучка дефлектор в принципе может быть заменен эквивалентным ему по силе отклонением пучка компенсирующим магнитным каналом (рис. 7), отстоящим от конечной равновесной орбиты на 3 см и поэтому мало возмущающим пучок.

Эффективность вывода частиц из ускорителя связана как с потерями на ноже дефлектора, так и в его канале. Акцептанс дефлектора У-400М составляет 20 мм·мрад, что ограничивает возможный разброс центров орбит ионов или величину амплитуды радиальных колебаний в пределах 3 мм и разброс энергии частиц в пучке на уровне $2 \cdot 10^{-3}$. Последний, в свою очередь, зависит от ширины диапазона фаз ускоряемых ионов $\Delta \varphi$ и стабильности основных параметров ускорителя $\Delta \varphi$, ΔU_0 , ΔB . Диапазон фаз ускоряемых ионов при этом ограничен величиной $\pm 6^\circ$, а необходимая стабильность магнитного поля из условия фазового сдвига частиц в процессе ускорения $\dot{\Delta} \sin \varphi = 2\pi n \Delta B c / \beta$ составит $2 \cdot 10^{-5}$, $\Delta I_n / I_n = 6 \cdot 10^{-5}$ и $\Delta f / f \approx 10^{-5}$, $\Delta V_0 / V_0 \approx 10^{-3}$. Точность же формирования распределения магнитного поля может быть в 5 + 6 раз меньше, поскольку отклонение реального распределения поля от изохронного обычно имеет вид волн. Число токовых катушек, корректирующих распределение среднего магнитного поля по радиусу с отклонением $\Delta B(r)$, выбирается из условия ускорения частиц с определенным смещением по фазе на данном радиальном промежутке Δr и допусков к радиальному градиенту среднего магнитного поля $\Delta (dB/dr)$, определяемых из условия сохранения пространственной устойчивости движения частиц $V_z > 0$, $V_r > 1$. Это определяет необходимость установки (использования) по крайней мере 14 корректирующих токовых катушек. Необходимо отметить, что осуществление вывода частиц из изохронного циклотрона с высокой (до 100%) эффективностью электростатическими дефлекторами возможно лишь при наличии дискретной геометрии орбит ускоряемых ионов. Однако здесь требуется стабильность ускоряющего напряжения на уровне 10^{-4} и ограничения фазовых сдвигов в пределах $\pm 0,5^\circ$ во всей области ускорения, что

требует чрезвычайно высокой точности шиммирования магнитного поля. При снижении коэффициента вывода (как в нашем случае) до 60 + 70% дискретность орбит не обязательна, что означает снижение требований к стабилизации параметров ускорителя, величине диапазона фаз ускоряемых ионов и разбросу по энергии частиц к концу ускорения, несколько превышающей прирост энергии за оборот.

В дополнение к рассмотренному выше проведено исследование вывода частиц из У-400М при пониженном вдвое наборе энергии ионом за оборот (0,3·Z, МэВ), что может оказаться важным в период пусконаладочных работ на циклотроне. Для эффективного вывода пучков в этом случае необходимо применение специальных мер, принудительно увеличивающих радиальное разделение орбит на конечных радиусах ускорения перед дефлектором. К ним относятся методы вывода пучков прецессией орбит^{/6/} и регенеративный^{/7/}. В последнем для возбуждения радиальных колебаний пучка используются один либо два градиентных канала. На рис. 8 представлена эволюция фазовой области пучка (α, R), где α — угол между касательными к траектории пучка и окружности радиуса R , при использовании двух каналов с градиентами ± 50 Гс/см, ± 100 Гс/см. Расчеты показывают, что при этом эмиттанс пучка должен быть ограничен величиной 5 мм·мрад.

В прецессионном методе используется возмущение основного магнитного поля в виде первой азимутальной гармоники с контролируемой амплитудой и фазой — $\Delta B_1 = h_1 \sin(\varphi + \psi)$. Основной вклад в радиальный заброс пучка определяется прецессией центров орбит, увеличивающей когерентные радиальные колебания пучка. Выбором значения фазы первой гармоники φ определяется направление прецессии центров орбит пучка (рис. 9), а ее амплитуды (рис. 10) — необходимое радиальное разделение орбит на входе в дефлектор (рис. 11).

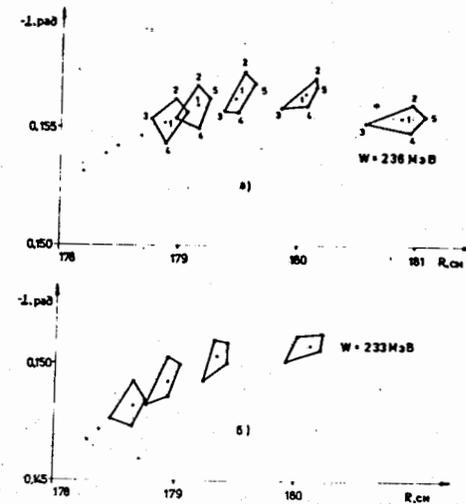


Рис. 8. Эволюция фазовой области пучка на конечных радиусах У-400М при использовании двух градиентных каналов с параметрами: $\Delta \varphi_{r,z} = 20^\circ$, $\Delta R = 10$ см, $\varphi_{r,z} = 90^\circ$, а) $G_{r,z} = \pm 50$ Гс/см, б) $G_{r,z} = \pm 100$ Гс/см.

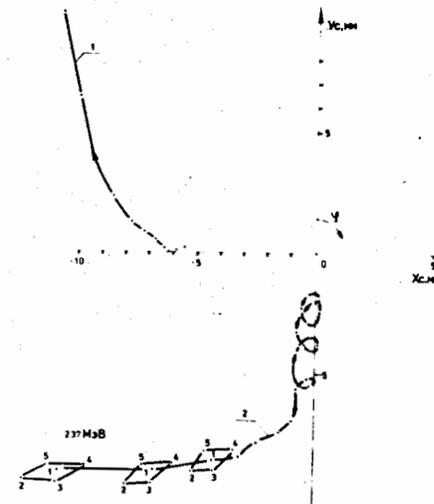


Рис. 9. Движение центра орбит ионов на конечных оборотах. 1) $h_1 = 25$ Гс, $\varphi = 0^\circ$, 2) $h_1 = 25$ Гс, $\varphi = 90^\circ$, $R_{h_1} = 178$ см.

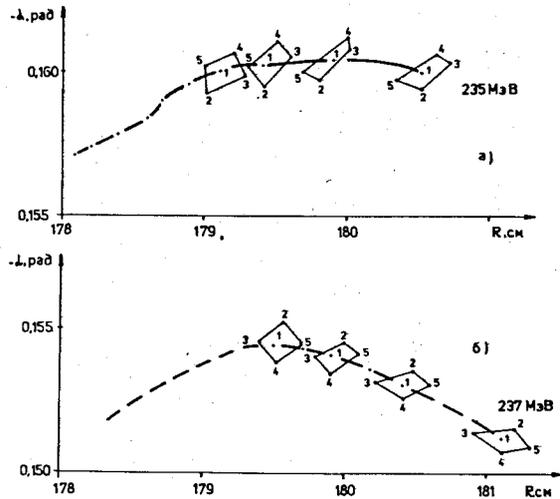


Рис. 10. Изменение радиального фазового пространства пучка в прецессионном методе вывода частиц из циклотрона У-400М.
а) $h_1 = 50$ Гс, б) $h_1 = 25$ Гс, $R_{h_1} = 175$ см.

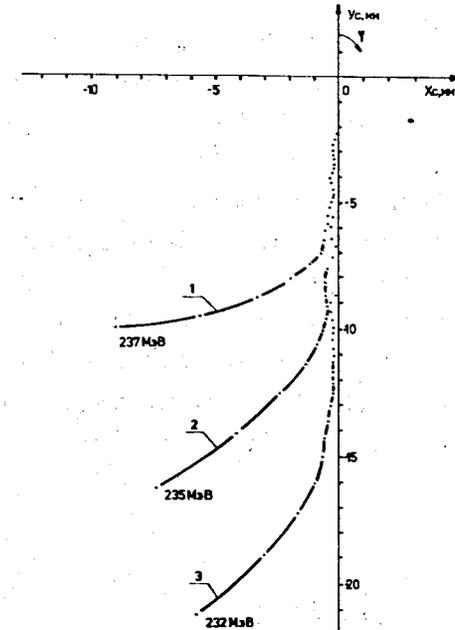


Рис. 12. Движение центра орбит пучка на последних оборотах под влиянием градиента первой азимутальной гармоники.
1) $h_1 = 0 \rightarrow 35$ Гс, 2) $h_1 = 0 \rightarrow 70$ Гс, 3) $h_1 = 0 \rightarrow 140$ Гс,
 $R_{h_1} = 170$ см.

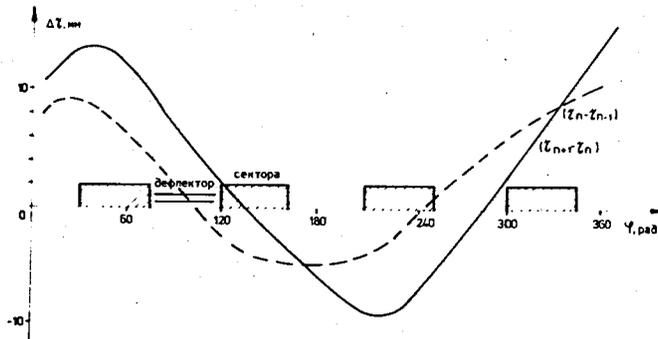


Рис. 11. Радиальное разделение орбит на последних оборотах пучка в циклотроне У-400М, $h_1 = 25$ Гс, $R_{h_1} = 175$ см.

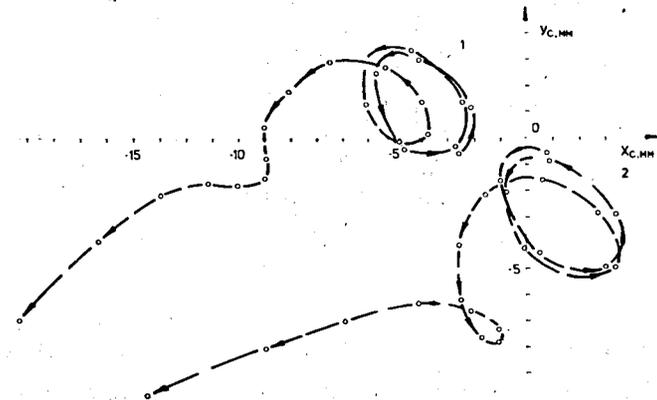


Рис. 13. Движение центра орбит ионов на конечных радиусах У-400М при действии $h_1 = 25$ Гс, $R_{h_1} = 170$ см и $\frac{\partial h_2}{\partial R} = 100$ Гс/см, $R_{h_2} = 175$ см, 1) $\varphi = 0$, 2) $\varphi = 90^\circ$, $w_k = 230$ МэВ.

Во всех предыдущих примерах амплитуда h_1 выбрана постоянной в области радиусов $170 + 180$ см. Исследование влияния градиента первой гармоники на разделение пучков (рис. 12) указывает на действие "усредненной" $\overline{h_1}$. Добавка к возмущению h_1 второй гармоники магнитного поля h_2 или ее градиента \mathcal{E}_{h_2} оказывает дополнительное влияние на величину радиального заброса пучка в зависимости от ее амплитуды и фазы (рис. 13).

Для основного варианта предполагается использовать дополнительную первую гармонику с постоянной амплитудой 25 Гс, получаемой с помощью токовых катушек коррекции магнитного поля циклотрона У-400М в диапазоне радиусов $R_{h_1} = 170 + 180$ см. Из рис. 14,

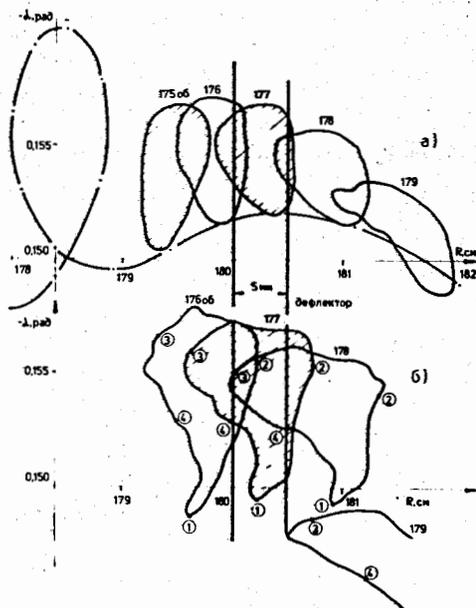


Рис. 14. Эволюция радиальной фазовой плоскости пучка на конечных радиусах ускорения с $R_{p.0} = 160$ см на последовательных оборотах при действии первой азимутальной гармоники $h_1 = 25$ Гс, $R_{h_1} = 170$ см. а) $\mathcal{E}_r = 7,5 \sqrt{\text{мм мрад}}$, б) $\mathcal{E}_r = 16 \sqrt{\text{мм мрад}}$.

где представлена эволюция преобразования изменения фазовой области пучка (α, R) на последовательных оборотах ускорения частиц с начального радиуса $R_{p.0} = 160$ см и с эмиттансом $7,5 \sqrt{\text{мм мрад}}$ и $16 \sqrt{\text{мм мрад}}$, следует, что эффективность вывода частиц за 2 + 3 оборота составит порядка 70% при толщине септума дефлектора 0,3 мм. Используемый в ЛЯР ОИЯИ на циклотронах У-200 и У-400^{4,8/} метод вывода пучков тяжелых ионов перезарядкой частиц на тонкой мишени предполагается использовать на У-400М при работе циклотрона в автономном режиме ускорения ионов ($\text{He}_4^{+1} \rightarrow +2, \text{C}_{12}^{+3} \rightarrow +6 \dots$), извлекаемых из собственного ионного источника. Проведенные расчеты траекторий движения частиц указали на особенность вывода, состоящую в том, что он наиболее эффективен, когда спиральность магнитного поля направлена против движения пучка (рис. 15), что предполагает ускорение частиц в направлении, противоположном основному (рис. 4). При использовании метода вывода перезарядкой удобно осуществлять плавное варьирование энергии выпускаемых и-

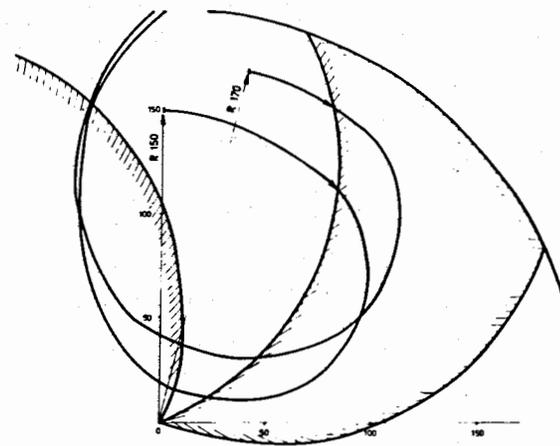


Рис. 15. Траектории пучков ионов He_4^{+1} , выводимых из циклотрона У-400М методом перезарядки ($\text{He}_4^{+1} \rightarrow \text{He}_4^{+2}$) на тонкой мишени с разных радиусов ускорения.

нов (в пределах 30%) путем установки перезарядной мишени на требуемый (по энергии частиц) радиус и соответствующий (для нацеливания выпускаемых ионов в тот же ионопровод) азимут. При ускорении на циклотроне У-400М ионов H_2^+ методом перезарядки может быть выведен пучок протонов ($\text{H}_2^+ \rightarrow 2p + e$) с энергией до 120 МэВ.

Применение двух способов вывода частиц на циклотроне У-400М в разных режимах его работы придает определенную гибкость в эксплуатации ускорителя.

Проведенные исследования позволили установить основные параметры систем выпуска, а дальнейший анализ распределений магнитных полей, полученных при измерении на полномасштабном магните, послужит для уточнения, изучения причин, влияющих на радиальный разброс ионов и, значит, на эффективность вывода пучков.

Литература

1. Оганесян Ю.Ц. и др., ОИЯИ 9-82-756, Дубна, 1982.
2. Флеров Г.Н. и др., ОИЯИ 9-84-555, Дубна, 1984.
3. Флеров Г.Н. и др., Труды УП Всесоюзн.совещ. по уск. заряжен. частиц, М., "Наука", т. I, с. 59, 1981.
4. Кленин Б.А. и др., ОИЯИ 9-10652, Дубна, 1977.
5. Андрианов А.М. и др., ОИЯИ 9-84-322, Дубна, 1984.
6. Gordon M.M., Blosser H.G., Conf. on Seet. foc. cycl. and meson fact., CERN 63-19, p.236, Geneva, 1962.
7. Kim H., IEEE Trans. on Nucl. Sco., NS-13, 4, p.58, 1966.
8. Шелаев И.А. и др., ОИЯИ Р9-4831, Дубна, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 марта 1989 года.