

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

Д 536

P9-88-243

**В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, Ле Киен Тхань,
О.В.Ломакина, З.Трейбал***

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПРОТОННОГО ПУЧКА С МИШЕНЬЮ
ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ УСКОРЕНИИ ПРОТОНОВ
И H^- -ИОНОВ В ЦИКЛОТРОНЕ**

*** | ИЯФ ЧСАН, Ржеж, СССР**

ВВЕДЕНИЕ

В работе ^{1/} рассмотрена возможность одновременного ускорения в изохронном циклотроне положительных и отрицательных ионов одного и того же элемента, например протонов и H^- -ионов, дейтронов и D^- -ионов и т.д. Каждый из ускоренных пучков выводится из камеры циклотрона в заданном направлении и используется по назначению. Таким образом, существенно возрастает эффективность эксплуатации ускорительной установки.

Пучок отрицательных ионов выводится из камеры циклотрона с помощью перезарядной мишени, пучок положительных ионов в процессе ускорения проходит через эту мишень и затем выводится с помощью электростатического deflectора.

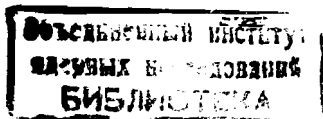
В данной работе приведены результаты аналитических и численных расчетов многократного прохождения протонного пучка через перезарядную мишень. При этом возникают ионизационные потери энергии протонного пучка, а также увеличение эмиттанса пучка из-за упругого рассеяния протонов на ядрах мишени.

Численные расчеты выполнены для изохронного циклотрона У-120М, работающего в Институте ядерной физики ЧСАН (Ржеж, ЧССР) ^{2/}, на котором планируется провести эксперимент по одновременному ускорению двух пучков.

1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕЗАРЯДКИ

С достаточной для данных расчетов точностью можно считать, что переход ионов H^- в H^+ происходит двухступенчато. Вначале $H^- \rightarrow H^0$ с сечением $\sigma_{-1,0}$, затем $H^0 \rightarrow H^+$ с сечением $\sigma_{0,1}$. Сечение прямого процесса $H^- \rightarrow H^+$ составляет менее 4% от $\sigma_{-1,0}$, и им можно пренебречь.

При энергии H^- -ионов в диапазоне 25 ÷ 40 МэВ соответствующие сечения перезарядки равны $\sigma_{-1,0} = (1,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ и $\sigma_{0,1} = (4,2 \pm 2) \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ на атом для мишени из углерода ^{3/}. Совместное решение уравнений кинетики для H^- и H^0 приводит к следующим зависимостям доли нейтралов и H^- -ионов после прохождения перезарядной мишени



$$D_{H^-} = \exp(-\sigma_{-1,0} \cdot N_a \cdot d/A), \quad (1)$$

$$D_{H^0} = \frac{\sigma_{-1,0}}{\sigma_{-1,0} - \sigma_{0,1}} [\exp(-\sigma_{0,1} \cdot N_a \cdot d/A) - \exp(-\sigma_{-1,0} \cdot N_a \cdot d/A)],$$

где N_a — число Авогардо, A — атомный вес материала мишени, d — толщина мишени в г/см^2 .

Для мишени минимальной толщины $d = 50 \text{ мкг/см}^2$ ($\sim 0,25 \text{ мкм}$) и вышеуказанных значений сечений из соотношений (1) найдем $D_{H^-} = 1,4 \cdot 10^{-11}$, $D_{H^0} = 0,8 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, в данном диапазоне энергий пучок H^- -ионов за одно прохождение практически полностью перезаряжается в пучок протонов при минимальной толщине углеродной мишени 50 мкг/см^2 .

2. РАДИАЛЬНАЯ ШИРИНА МИШЕНИ

Для того чтобы все частицы пучка H^- -ионов пересекли перезарядную мишень, ее ширина вдоль радиуса должна несколько превышать радиальное расстояние между соседними траекториями частиц пучка. С другой стороны, желательна минимальная ширина мишени для уменьшения числа прохождений через нее протонов второго пучка.

Изменение радиуса частицы в процессе ускорения с достаточной точностью описывается выражением

$$r = \Delta r \cdot \nu + a \cdot \cos(2\pi Q_r \cdot \nu + \theta_0), \quad (2)$$

где Δr — набор радиуса за оборот, ν — число оборотов, Q_r — относительная частота радиальных колебаний, a , θ_0 — амплитуда и начальная фаза свободных радиальных колебаний. Радиальный шаг между соседними траекториями можно записать в виде

$$\delta r = \Delta r (\nu_2 - \nu_1) + 2a \sin[\pi Q_r (\nu_2 + \nu_1) + \theta_0] \cdot \sin \pi Q_r (\nu_2 - \nu_1), \quad (3)$$

где ν_2 , ν_1 — последовательные номера произвольно выбранных оборотов.

Если ν_2 , ν_1 достаточно велики, то из (3) получим формулу

$$\delta r \approx \Delta r + 2a \sin(2\pi Q_r \cdot \nu + \theta_0) \cdot \sin(\pi Q_r). \quad (4)$$

Считая, что начальные фазы свободных колебаний распределены равномерно, определим максимальный радиальный шаг между соседними

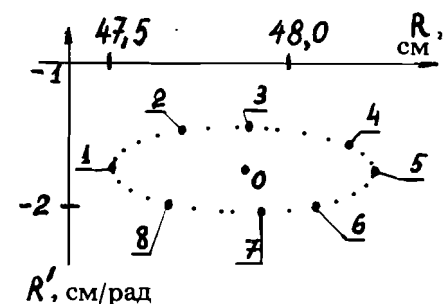


Рис.1

траекториями для конечных радиусов циклотрона У-120М. В режиме ускорения протонов до энергии $35 \div 38 \text{ МэВ}$ и при напряжении на дуанте 50 кВ амплитуда свободных колебаний достигала $0,35 \text{ см}$ и $\Delta r = 0,06 \text{ см}$, $Q_r = 1,04$, при этом $\delta r_{\text{max}} = 0,15 \text{ см}$. Для проверки точности формулы (4) был проведен численный расчет для восьми частиц с амплитудой $a = 0,35 \text{ см}$ при различных начальных фазах начального эллипса радиальных

колебаний (рис.1), соответствующего энергии протонов 33 МэВ . Из этого расчета следует, например, что при ширине мишени, равной $0,1 \text{ см}$, одна из восьми частиц, соответствующая фазе 4 на рис.1, не пересекает мишень, а при ширине мишени $0,15 \text{ см}$ все восемь частиц проходят через мишень. Таким образом, ширина перезарядной мишени для циклотрона У-120М должна быть не менее $0,15 \text{ см}$.

3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Средняя потеря энергии протоном на единице длины тормозящей среды определяется формулой Блоха ^{4/}

$$\frac{dE}{dx} = -0,307 \rho \cdot \left(\frac{z}{A}\right) \cdot \left[\frac{1}{\beta^2} \ln \left(\frac{1,02 \cdot 10^6 \cdot \beta^2 \cdot \gamma^2}{I} \right) - 1 \right] \left(\frac{\text{МэВ}}{\text{см}} \right), \quad (5)$$

где z , ρ , I — заряд, плотность в г/см^3 и средний потенциал ионизации в эВ тормозящей среды, β , γ — относительная скорость и релятивистский фактор протона. Например, для мишени из углерода ($z/A = 0,5$, $\rho = 2,25 \text{ г/см}^3$, $I = 78 \text{ эВ}$) средние потери для протона с энергией $W = 37 \text{ МэВ}$ будут составлять $dE/dx = -32,7 \text{ МэВ/см}$. При толщине перезарядной мишени в диапазоне $0,25 \div 1 \text{ мкм}$ потери энергии протоном за одно прохождение будут изменяться: $\Delta W = 0,82 \div 3,27 \text{ кэВ}$. Следовательно, при максимальной толщине мишени 1 мкм и напряжении на дуанте 50 кВ перезарядная мишень не вносит существенных изменений в процесс ускорения протонного пучка, обеспечивая в то же время полный вывод пучка H^- -ионов.

4. МНОГОКРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ

В процессе ускорения в области конечных радиусов пучок протонов многократно проходит перезарядную мишень. При этом из-за упругого рассеяния протонов в мишени эмиттансы пучка могут увеличиться. Средний квадрат угла рассеяния при прохождении слоя вещества мишени толщиной 1 г/см^2 дается выражением ^{/4/}

$$\theta_s^2 = 16\pi \cdot N_a \cdot \frac{z^2}{A} \cdot \frac{r_p^2}{\beta^4 \gamma^2} \ln \left[196 \cdot z^{-1/3} \left(\frac{z}{A} \right)^{1/6} \right], \quad (6)$$

где r_p — классический радиус протона, N_a — число Авогадро. Проекция среднеквадратичного значения угла многократного рассеяния на выбранную плоскость для мишени толщиной δ_M (см) равна

$$\sigma = \theta_s \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot \delta_M}{2}}, \quad (7)$$

где δ_M — толщина мишени (см).

На рис.2 показаны зависимости среднеквадратичного угла рассеяния (σ) от энергии протона при различной толщине мишени. Материал мишени — углерод $^{12}\text{C}^6$. Линии 1, 2, 3, 4 рассчитаны соответственно для величин толщины 5 мкм, 2 мкм, 1 мкм и 0,2 мкм.

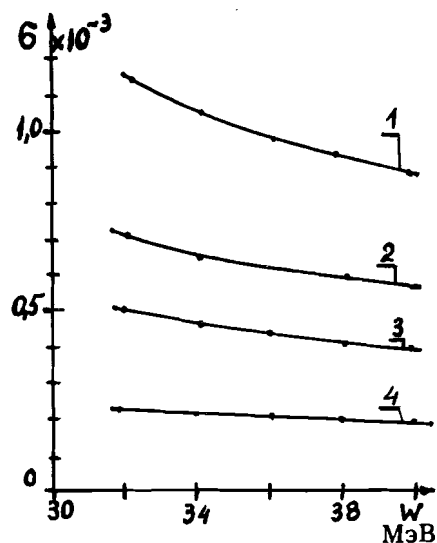


Рис.2

5. ПРОГРАММА РАСЧЕТА И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Программа расчета динамики частиц при одновременном ускорении двух пучков в циклотроне У120М написана на основе программы VIVOD^{/5/} для ЭВМ БЭСМ-6. Были проведены расчеты для H^- -ионов и для протонов. Так как изменения радиальных и вертикальных углов частиц при рассеянии в мишени имеют случайный характер, то в программе используется генератор псевдослучайных чисел^{/6/}. Этот гене-

Таблица

Номер рис.	Номер частиц	R_0 , см	R'_0 , рад.	Z_0 , см	Толщина мишени δ_M , мкм	Средн. квадр. угол расс. σ , м.рад	Число набора расчетов	Оборот 1-го касания мишени	Число прохода S
3	а	47,5	-1,77	0,3	1	0,5	20	19И	1+2
	б	47,7	-1,5	0,3	1	0,5	20	17И	1+2
	в	47,89	-1,49	0,3	1	0,5	20	16И	1
4	а	48,15	-1,57	0,3	1	0,5	20	15И	1
	б	48,27	-1,77	0,3	1	0,5	20	13И	1
	в	48,08	-2,02	0,3	1	0,5	20	11И	1+2
5	а	47,62	-2,08	0,3	1	0,5	20	10И	2+9
	б	47,865	-1,78	0,3	1	0,5	20	15И	1+3
8	а	47,65	-2,02	0,3	1	0,5	40	10И	3+13
	б	47,65	-2,02	0,3	0,2	0,2	20	10И	8-13
9	а	47,65	-2,02	0,3	0,05	0,1	20	10И	11+12
	б	47,865	-1,78	0	1	0,5	20	15И	1+3
10	б	47,65	-2,02	0,3	1	0,5	50	10И	3+18

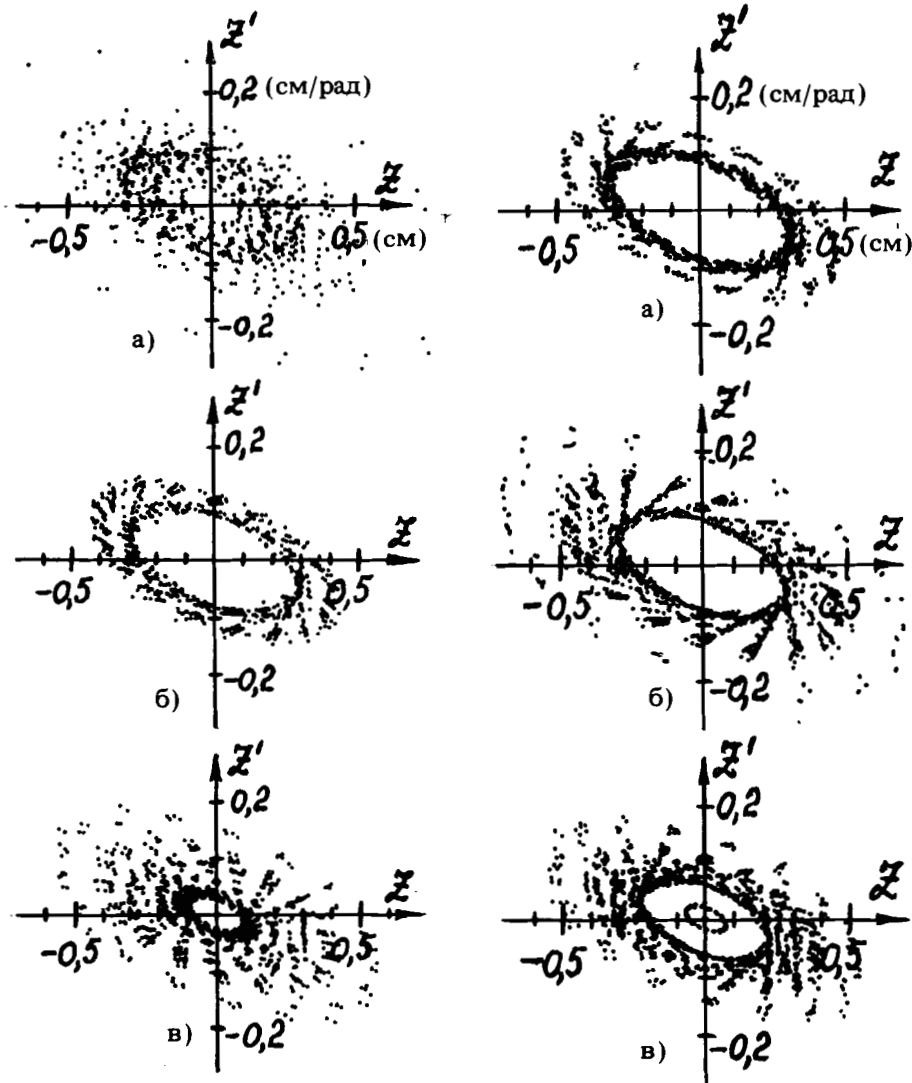


Рис.3

ратор вводится в действие на азимуте $117,5^\circ$ (то есть на месте 2-го пробника циклотрона У-120М, где намечено установить мишень) и работает в диапазоне радиусов, соответствующих радиальным координатам мишени. Радиус начала мишени равен 48,5 см, где энергия H^- ионов достигает 34 МэВ. Радиус конца мишени — 48,65 см. Когда ча-

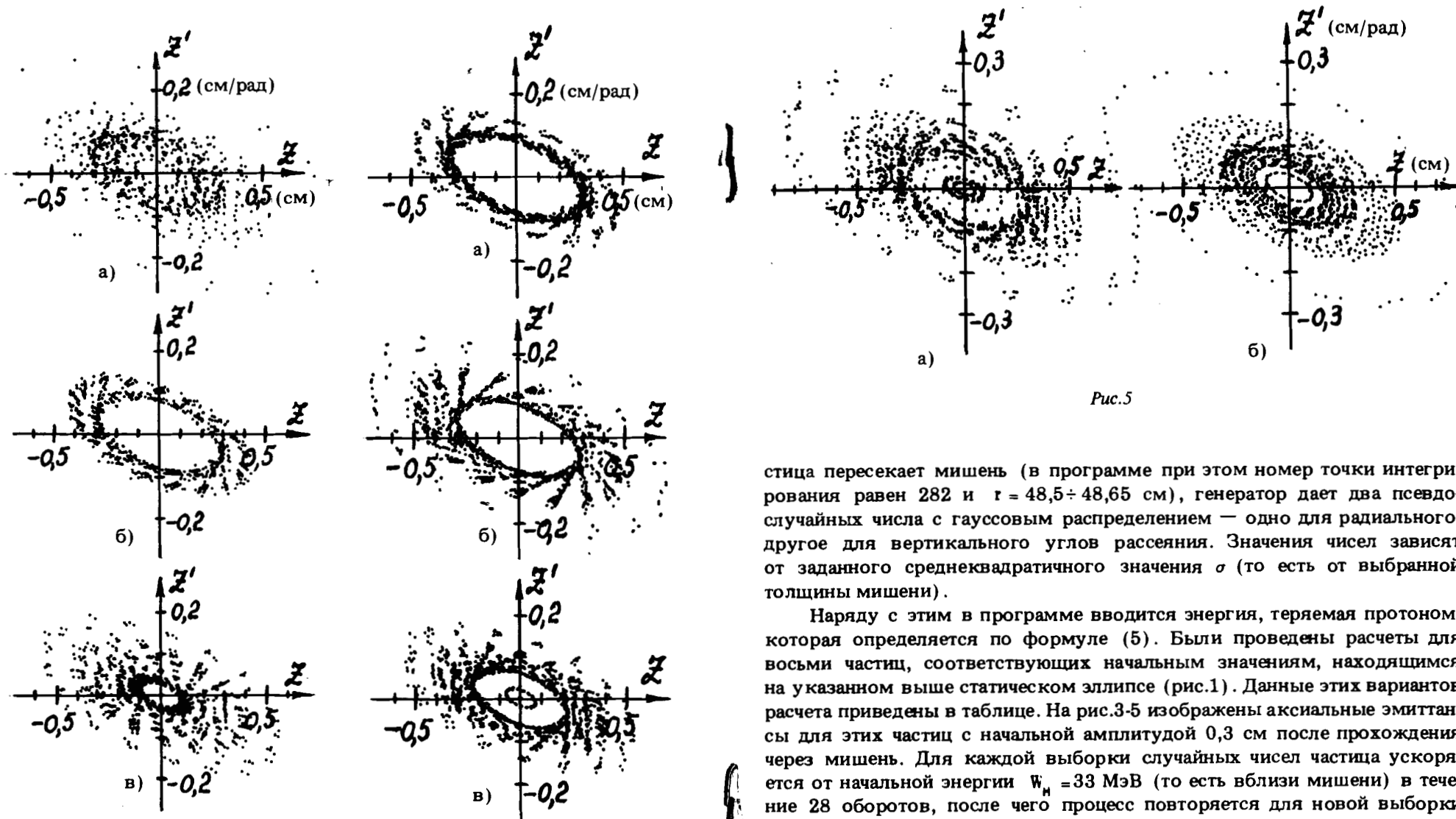


Рис.5

стица пересекает мишень (в программе при этом номер точки интегрирования равен 282 и $r = 48,5 \div 48,65$ см), генератор дает два псевдослучайных числа с гауссовым распределением — одно для радиального, другое для вертикального углов рассеяния. Значения чисел зависят от заданного среднеквадратичного значения σ (то есть от выбранной толщины мишени).

Наряду с этим в программе вводится энергия, теряемая протоном, которая определяется по формуле (5). Были проведены расчеты для восьми частиц, соответствующих начальным значениям, находящимся на указанном выше статическом эллипсе (рис.1). Данные этих вариантов расчета приведены в таблице. На рис.3-5 изображены аксиальные эмиттансы для этих частиц с начальной амплитудой 0,3 см после прохождения через мишень. Для каждой выборки случайных чисел частица ускоряется от начальной энергии $W_H = 33$ МэВ (то есть вблизи мишени) в течение 28 оборотов, после чего процесс повторяется для новой выборки случайных чисел. Каждые 20 наборов случайных чисел считаются за два с половиной часа на ЭВМ БЭСМ-6.

Как видно из приведенных рисунков, при одной и той же толщине мишени (то есть при одинаковых значениях среднего квадрата угла рассеяния $\langle \sigma^2 \rangle$) эмиттансы частиц изменяются по-разному. Это объясняется двумя причинами:

Во-первых, из-за свободных радиальных колебаний число прохождений через мишень (S) у частиц с различными начальными условиями — разное (см. таблицу). Так, например, если у 1-й, 2-й частиц $S = 1 \div 2$,

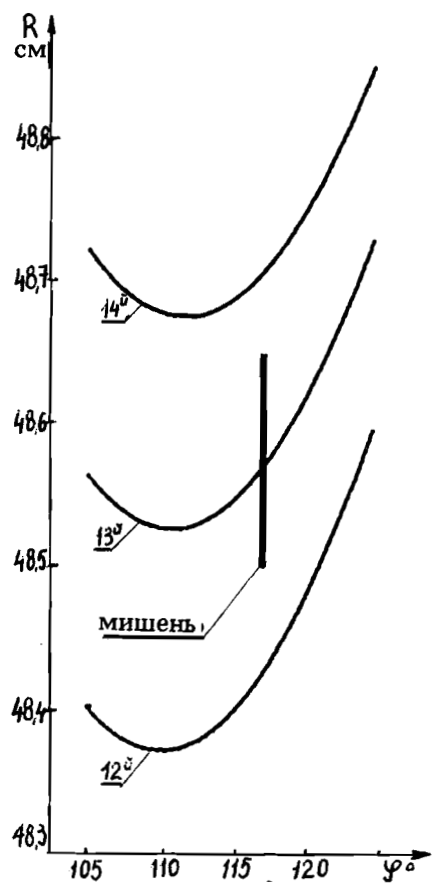


Рис.6

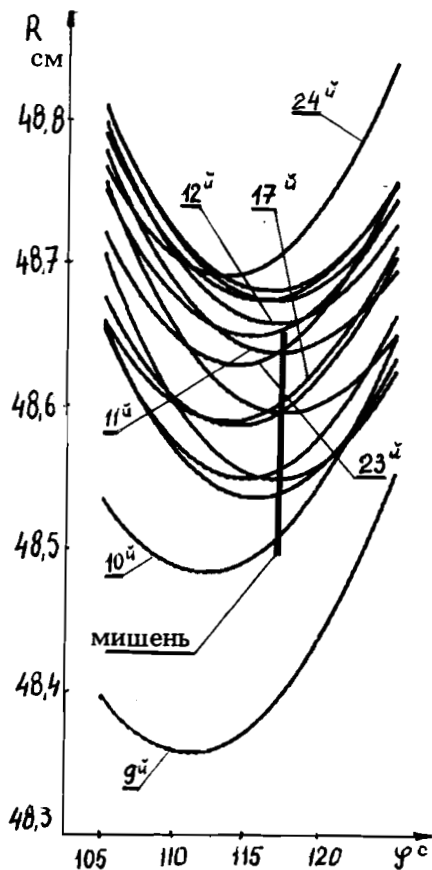


Рис.7

у 4-й частицы $S=1$, то у 8-й $S=3+13$ (в зависимости от выборки). Рис.6 показывает, что 4-я частица проходит через мишень шириной 1,5 мм только на 13-м обороте. А на рис.7 можно увидеть, что для одного из наборов случайных чисел частица № 7 сначала дважды проходит через мишень на 10-м и 11-м оборотах, а затем снова пересекает ее с 17-го по 23-й обороты. Очевидно, максимальное искажение эмиттанса для частицы, у которой наибольшее число проходов S . В данном случае это частица № 8 (см.рис.8).

Во-вторых, из-за разных фаз радиального колебания частицы пересекают мишень при разных числах оборотов (см. таблицу), то есть в момент касания мишени скорости z'_M у них разные из-за различных

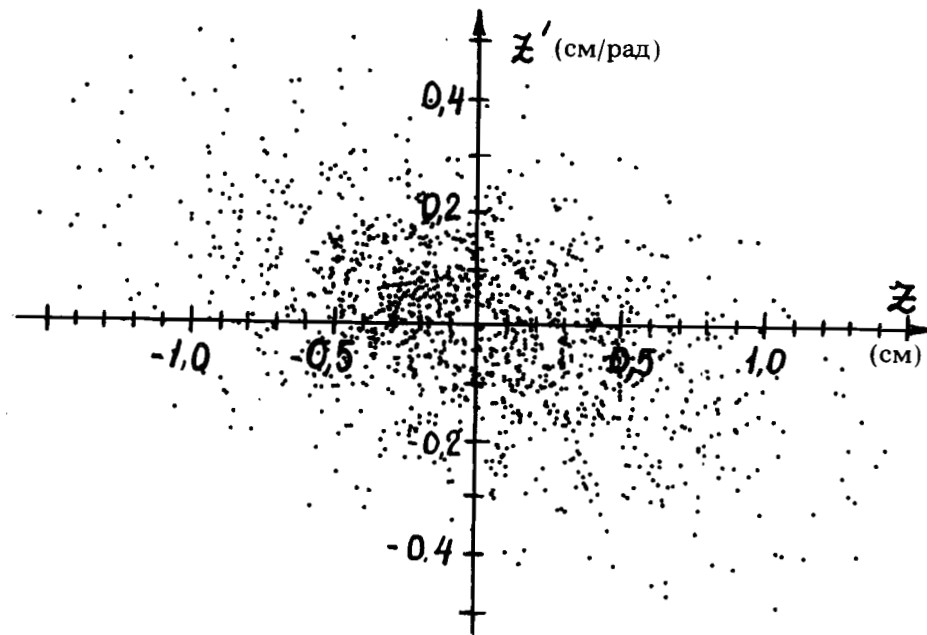


Рис.8

аксиальных колебаний, так как $Q_z \ll 1$. Этим объясняется то обстоятельство, что при одних и тех же числах прохода S (например, у 3-й, 4-й, 5-й частиц $S=1$) эмиттансы их отличаются. Чем больше скорость в момент касания мишени z'_M , тем больше искажаются эмиттансы частиц после мишени. На рис.9а,б показаны эмиттансы частицы № 8 при уменьшении толщины мишени ($\delta_M = 0,2$ мкм и $\delta_M = 0,05$ мкм). Уменьшение толщины приводит к уменьшению влияния радиальных толчков и поэтому число проходов S уравнивается (см.таблицу). На рис.9 в показан эмиттанс для начальной амплитуды $z_0 = 0$ для мишени с $\delta_M = 1$ мкм.

Если использовать С-образную мишень (см.рис.10а), то можно несколько уменьшить искажение аксиального эмиттанса частиц при рассеянии следующим образом. После выхода из мишени частицы, у которых z больше значения Δz (в данном случае $\Delta z = 0,4$ см), попадают еще раз на "рога" мишени. Если при этом z в результате случайного толчка $\delta z'$ продолжает увеличиваться, частица сразу теряется. Если же z уменьшается, то на следующем обороте частица попадает в зазор между "рогами" и ускоряется до конца. На рис.10 б показан эмиттанс частицы № 8, проходящий через С-образную мишень.

Здесь видна некоторая концентрация частиц в зоне $-0,4 < z < 0,4$. Но, с другой стороны, некоторые частицы дальше разбросаны по сравнению с эмпиансом для той же частицы из рис.8 (обычная мишень). Этим способом возможно снизить попадание рассеянных частиц на систему вывода.

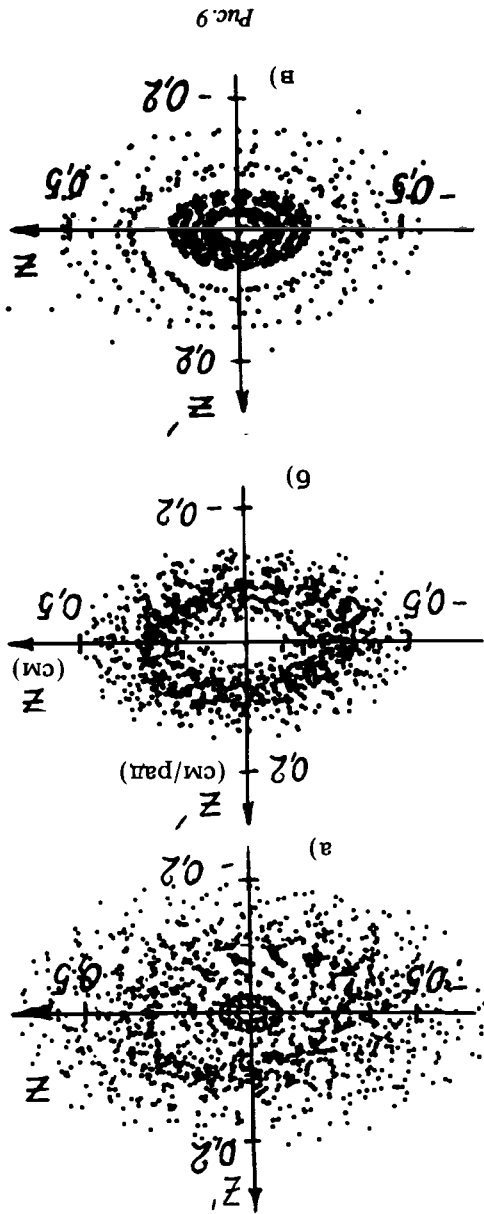


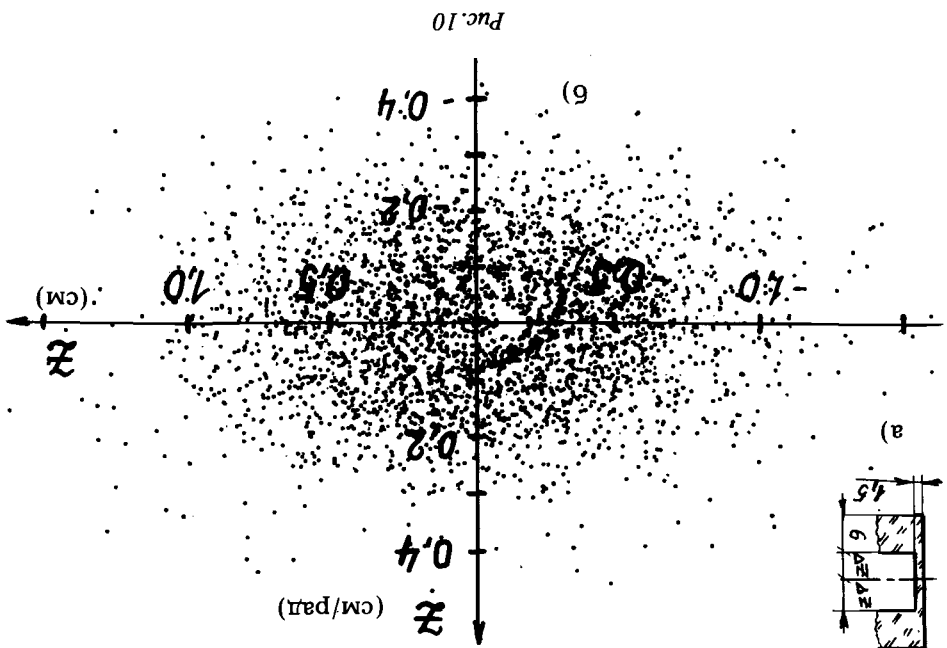
Рис.9

На основе результатов проведенных расчетов следует сделать вывод, что потери протонов из-за рассеяния после прохождения перезарядной мишени при одновременном ускорении двух пучков в циклотроне У-120М составляют существенно меньше одной восьмой интенсивности пучка (при толщине мишени $\delta_M = 1$ мкм). Эти потери уменьшатся, если возможно будет использовать мишень меньшей толщины или С-образную мишень.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриевский В.Л. и др. ОИЯИ, Р9-87-703, Дубна, 1987.
2. Байтосев В. и др. - В сб.: Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.2. Дубна. ОИЯИ, с.20.
3. Беркер К.Н. et al. - Phys.Rev., 1964, 134, 6A, p.1461.
4. Росси Б. Частицы большой энергии (перевод с англ.), М.: НИИЯЛ, 1955.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ



5. Дмитриевский В.П. и др. – В сб.: *Материалы III Сессии по изохронному циклотрону У-120М и его использованию для решения физических проблем.* Р9-7339, Дубна: ОИЯИ, 1973, с.102.
6. Дмитриевский В.П. и др. ОИЯИ, Р9-9067, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 апреля 1988 года.

Дмитриевский В.П. и др.

P9-88-243

Взаимодействие протонного пучка с мишенью при одновременном ускорении протонов и H^- -ионов в циклотроне

Приведены результаты аналитических и численных расчетов многократного прохождения протонного пучка через перезарядную мишень при одновременном ускорении двух пучков в изохронном циклотроне. Перезарядная мишень предназначена для вывода пучка H^- -ионов. Протонный пучок после пересечения перезарядной мишени выводится с помощью электростатического дефлектора. Численные расчеты выполнены для изохронного циклотрона У-120М Института ядерной физики ЧСАН (Ржев, ЧССР). Показано, что многократное прохождение протонного пучка с энергией $30 + 40$ МэВ через мишень приводит к незначительному увеличению аксиального эмиттанса пучка.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод авторов

Dmitrievskiy V.P. et al.

P9-88-243

Interaction of Proton Beam with Target at Simultaneous Acceleration of Proton and H^- -ions in a Cyclotron

The results of analytical and numerical calculations of a repeated passage of the proton through a recharging target at the simultaneous acceleration of both beams. The recharging target is intended for the H^- -ion beam extraction. After it passed through the recharging target the proton beam is extracted by the electrostatic deflector. The numerical calculations have been performed for the U-120M isochronous cyclotron installed at the Institute of Nuclear Physics (Rez, CSSR). It has been shown that the repeated passage of the proton beam (with the energy of about $30 + 40$ MeV) through the target leads to an insignificant increase in the vertical emittance of the beam.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988