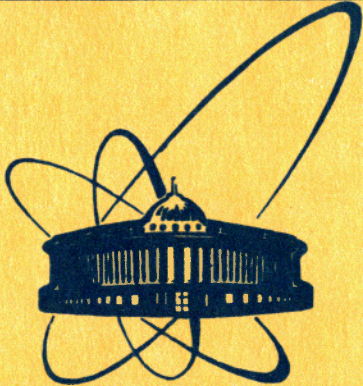


84-480



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

84-480

9-84-480

S

Г.Г.Гульбемян, А.М.Мордуев

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫВОДА ПУЧКОВ ИОНОВ
МЕТОДОМ ОБДИРКИ
ИЗ ЦИКЛОТРОНА У-400**

1984

В настоящее время на циклотроне У-400 осуществлено ускорение ионов в диапазоне масс от $14 / {}^{14}\text{N} /$ до $84 / {}^{84}\text{Kr} /$. Получены интенсивности пучков от 10^{14} с^{-1} для ${}^{14}\text{N}$ до $2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ для ${}^{84}\text{Kr}$.

Вывод ионов производится методом обдирки электронов $^{1-5/}$ на графитовых фольгах толщиной $40-50 \text{ мкг/см}^2$, с возможностью вариации энергии радиальным и азимутальным перемещением фольги без перестройки уровня магнитного поля.

Проведение ядерно-физических экспериментов на выведенных пучках требует эффективного вывода и транспортировки широкого диапазона ионов различных энергий по одному и тому же ионопроводу.

Исследованию возможности реализации этого требования для циклотрона У-400 и оптимизации системы вывода посвящена эта работа.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для расчета параметров вывода использовались программа JOSEF $^{6/}$ и элементы программы TORUZ $^{7/}$, разработанные для исследования вывода ионов из циклотронов У-200 и У-300.

Программа JOSEF реализует решение задачи численным интегрированием уравнений движения заряженной частицы в магнитном поле. Использование полной карты магнитного поля в поиске подходящей траектории, при нахождении большого числа траекторий, нерационально. Поэтому автором программы была применена аппроксимация радиального распределения магнитного поля циклотрона полиномами, по методу наименьших квадратов.

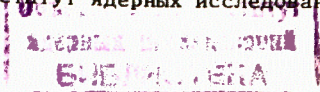
Магнитное поле в рабочем зазоре У-400 аппроксимируется полиномом одиннадцатой степени с точностью $10^{-4}-10^{-3}$, что сравнимо с точностью измерений. В этом случае $B(r)$ имеет вид

$$B(r) = C_0 + \sum_{n=1}^m C_n \cdot r^n.$$

В области рассеянного поля циклотрона $R = /1,8-2,6/ \text{ м}$ лучшее согласование дает аппроксимация вида $B(r) = B_0 / (1 + e^X)$ с полиномом восьмой степени в показателе экспоненты $X = C_0 + \sum_{n=1}^m C_n \cdot r^n$.

Величина B_0 определяется из условий "сшивания" основного рабочего и рассеянного полей.

Интегрирование уравнений движения по времени ведется с шагом, составляющим малую долю периода обращения иона в циклотроне. При переходе границ холм - долина - холм шаг уменьшается до получения относительной точности конечного результата $10^{-4} /^{6,7/}$.



Для расчетов использовано магнитное поле, соответствующее ускорению ионов с отношением атомного веса к заряду (A/Z), равным 10, как наиболее характерных для У-400.

Коэффициент обдирки $q = Z_2 / Z_1 / Z_1$ и Z_2 - заряд иона до и после обдирки, соответственно, в основном зависящий от энергии иона, материала и толщины обдирочной мишени^{18/}, для ионов, ускоряемых на У-400, лежит в пределах 3-4.

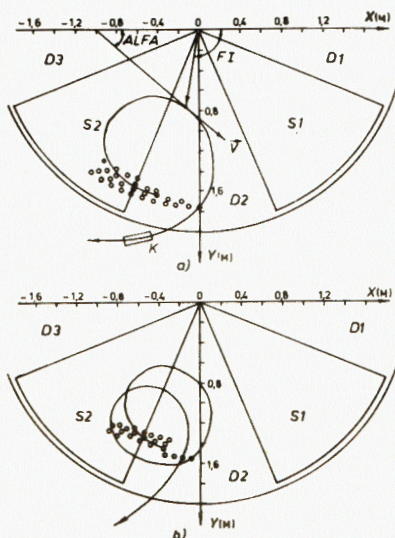
Проведение активной коррекции положения и размеров выводимого пучка требует слежения за изменением его фазового эллипса вдоль всей выводной траектории. Эта задача решается программой в два этапа:

первый - вычисляется центральная /реперная/ траектория, второй - определяются матрицы преобразования малых отклонений от реперной траектории. По этим матрицам находят размеры фазового эллипса пучка вдоль траектории.

В программу счета заложено ограничение на аксиальный размер пучка, равный 42 мм, что соответствует минимальному зазору между секторами. Кроме того, программа допускает установку вдоль трассы пучка экранирующих и фокусирующих каналов.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В зависимости от коэффициента обдирки, от радиального и азимутального положений фольги, пучок ионов выводится из камеры циклотрона, совершив один либо два оборота в магнитном поле. На рис.1 представлены типичные траектории ионов при однооборотном и двухоборотном выводах.



Установка обдирочной фольги в диапазоне радиусов /1,40-1,75/ м позволит варьировать энергию выведенных ионов на величину ~ 35%.

Для ряда выводных радиусов из указанного диапазона были определены области азимутального положения фольги, удовлетворяющие вылету пучка за пределы

Рис.1. Траектории ионов после обдирки: а/ однооборотный вывод, б/ двухоборотный вывод. Кружочками обозначена область установки обдирочной фольги, удовлетворяющая условиям вывода.

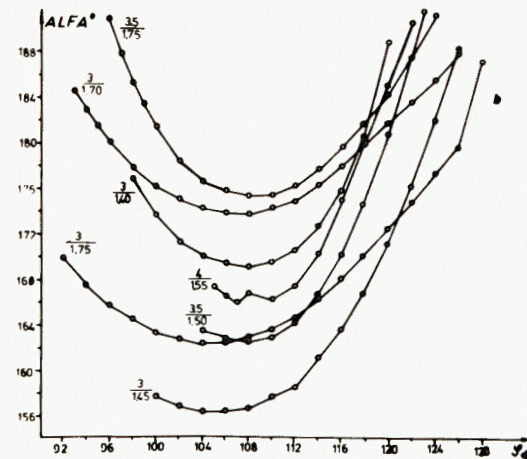
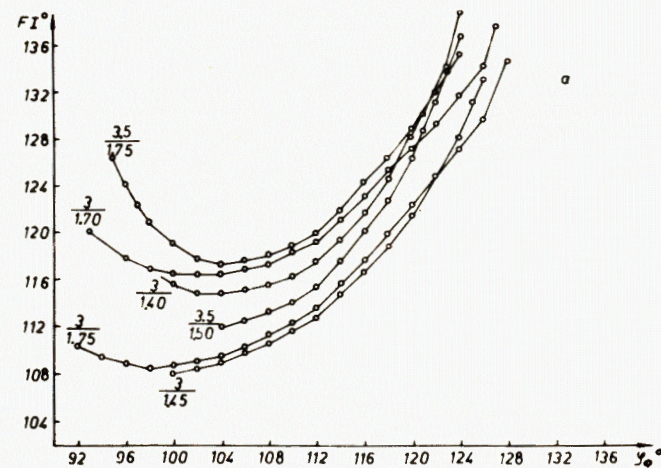


Рис.2. Расчетные зависимости от азимута обдирочной фольги: а/ положения выведенных пучков на радиусе $R = 2,60$ м, б/ направления векторов скорости. Числами указаны: в числителе - коэффициент обдирки, в знаменателе - радиус вывода в метрах.

вакуумной камеры циклотрона на радиус $R = 2,60$ м, при соблюдении поставленных ограничений на аксиальный размер пучка /рис.1/.

Для $R = 2,60$ м определены зависимости положения центров выведенных пучков (FI) и направления скорости ионов (ALFA) от азимутального положения фольги. Такие расчеты проводились для коэффициентов обдирки $q = 3; 3,5; 4$. Результаты представлены на рис.2.

Для выбора положения и направления канала транспортировки удобно иметь общую картину зависимостей направления векторов скорости пучков, выведенных за пределы вакуумной камеры, от их положения /рис.3/.

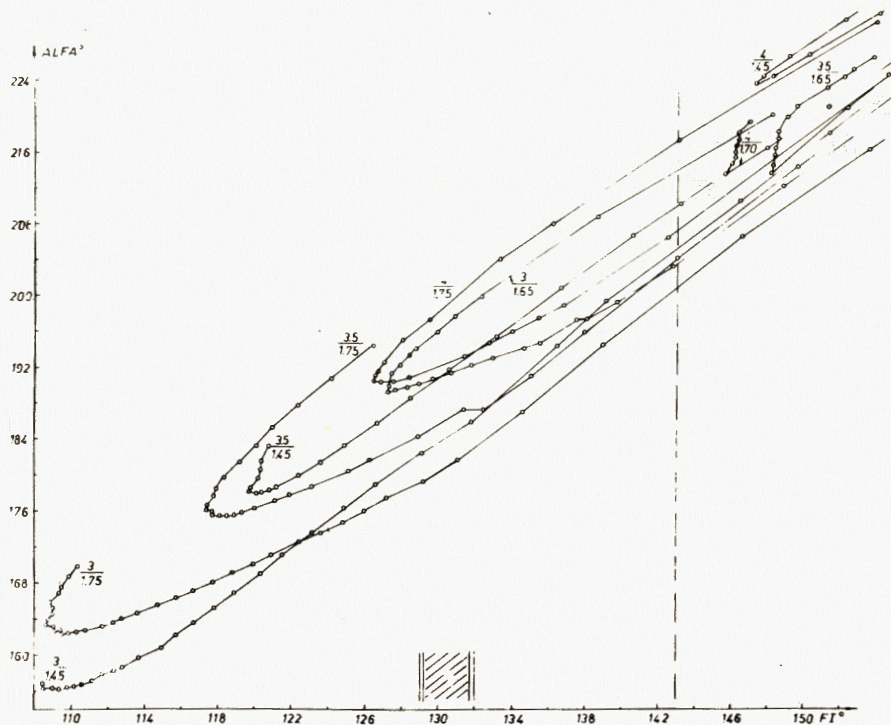


Рис.3. Общая картина зависимостей направления векторов скорости выведенных пучков от их положения на радиусе $R=2,60$ м.

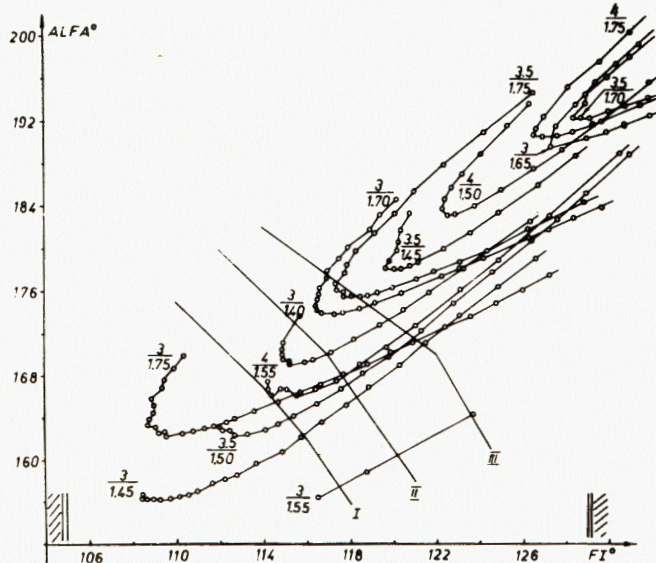


Рис.4. Зависимости $ALFA = f(FI)$ на выводном фланце для ряда выводных радиусов и коэффициентов обдирки.

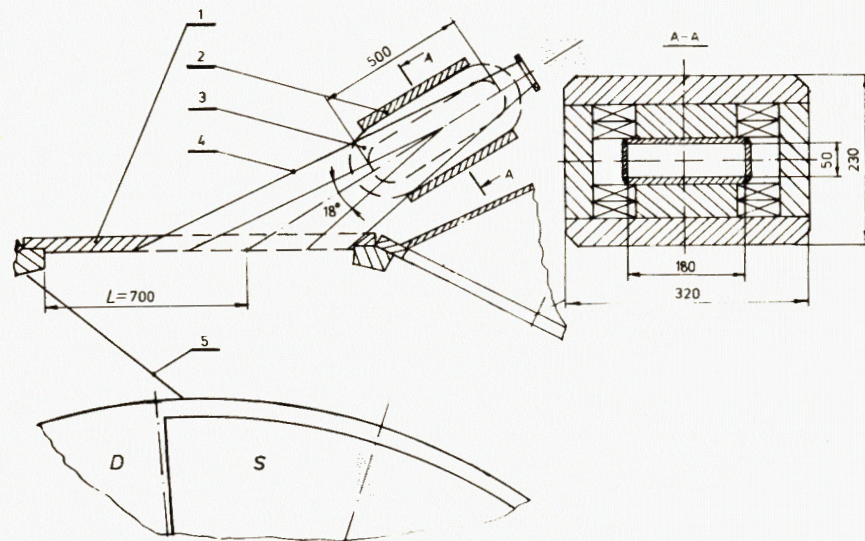


Рис.5. Схема расположения корректирующего магнита и его конструкция: 1 - выводной фланец камеры циклотрона, 2 - ярмо магнита, 3 - токовые катушки, 4 - выводная камера, 5 - ось сканирующего пробника.

Конструктивные особенности камеры циклотрона наложили ограничения на положение канала транспортировки пучков. Поэтому далее рассматриваются пучки, вылетающие на фланец вакуумной камеры ускорителя с координатой положения (FI), лежащей в диапазоне $/105-129/^\circ$. Рис.4 дает более подробную картину зависимостей $ALFA = f(FI)$ для диапазона выводных радиусов и коэффициентов обдирки.

Необходимо отметить, что кроме непрерывных зависимостей расчеты дают еще целый ряд дискретных положений фольги, удовлетворяющих поставленным условиям вывода. Каждое из них может явиться предметом отдельного изучения. В данной работе ставилась задача расчета широкодиапазонного канала вывода, и эти точки в дальнейшем рассмотрении отсутствуют.

Ось канала транспортировки пучка характеризуется на рис.3 и 4 точкой. Поэтому для перевода различных пучков в один и тот же канал возникает необходимость установки корректирующего магнита. Вдоль оси канала пойдут те пучки ионов, траектории которых до коррекции были направлены в центр магнита. Корректирующие возможности магнита характеризуются на рис.4 линией, пересекающей кривые $ALFA = f(FI)$. По точкам пересечения определяются требуемый угол коррекции и диапазон корректируемых пучков, который зависит от положения магнита относительно фланца камеры. На рис.4 представлены возможности магнита для трех его положений, I, II и III.

которые отличаются друг от друга расстоянием (L), указанным на рис.5. / I - L = 500 мм, II - L = 600 мм, III - L = 700 мм/.
 Вследствие конструктивных особенностей на У-400 реализованы два варианта вывода пучка в противоположных направлениях - I и III.

На рис.5 схематично представлена конструкция магнита и его положение, соответствующее линии III на рис.4.

Две пары токовых катушек обеспечивают в рабочем зазоре магнита поле величиной 0,4 Т. При длине магнитной дорожки 500 мм этого достаточно для коррекции углового отклонения пучка от оси ионопровода $\pm 9^\circ$.

Тем не менее, оба варианта не обеспечивают, без дополнительной коррекции, вывода широкого спектра пучков ионов в один и тот же ионопровод и, самое главное, не позволяют вывести в него пучки с конечных радиусов ускорения /1,70-1,75/ м.

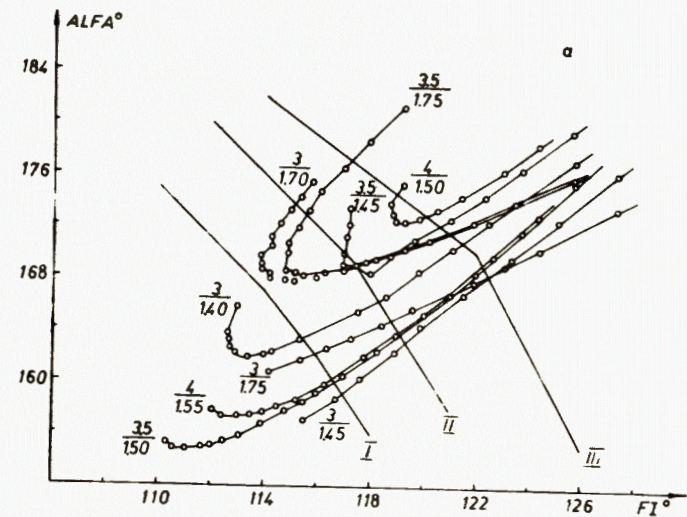
Установка экранирующего канала в области интенсивного спада магнитного поля циклотрона со сбросом поля в канале $\Delta B = \pm 0,2-0,4$ Т позволит вывести пучки также и с конечных радиусов /1,70-1,75/ м. Как видно из сравнения рис. 4 и 6, это касается всех трех вариантов установки выводного корректирующего магнита.

Одним из основных параметров для расчета условий транспортировки ионов по ионопроводу являются линейные размеры и расходимость пучка на входе в ионопровод. Расчет этих параметров, а также исследование влияния на них разброса ионов в пучке по импульсам $\Delta P/P$ проводились на заключительной стадии расчетной части работы.

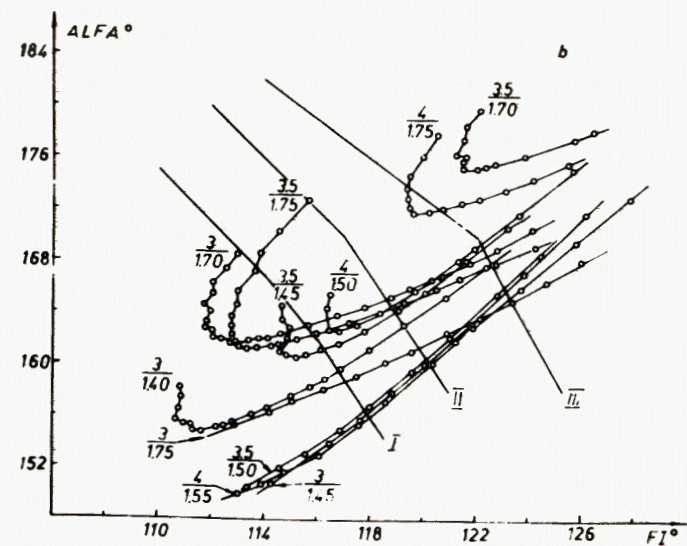
По данным измерения энергии ионов, выведенных из циклотрона У-400, относительный разброс по энергии составляет величину $\Delta E/E = 1\%$

На основе начальных величин радиального и аксиального эмиттансов пучка на обдирочной фольге, равных 80 мм мрад и 40 мм мрад соответственно, и с учетом величины $\Delta P/P = 0,5\%$, были просчитаны параметры фазовых эллипсов пучка вдоль всей траектории вывода.

Наличие в пучке разброса ионов по импульсам приводит к появлению линейной и угловой дисперсии пучка. Вследствие этого на входе в ионопровод наблюдается увеличение размера и расходимости пучка в горизонтальном направлении. Для уменьшения горизонтального размера пучка в первом дублете магнитных линз требуется установка в области рассеянного поля циклотрона радиально-фокусирующего канала с поперечным градиентом магнитного поля $G = 1,0$ Т/м. Функции экранирующего и фокусирующего каналов могут быть совмещены. На рис.7 представлены зависимости основных параметров пучка от азимута обдирочной фольги для одно- и двухобrotnого вывода с учетом действия канала и без него. Параметры магнитного канала: сброс поля в канале $\Delta B = 0,2$ Т; длина - 0,5 м; поперечный градиент - 1,0 Т/м; радиус начала канала - 2,10 м.



a/



б/

Рис.6. Зависимости $ALFA = f(FI)$ на выводном фланце с экранирующим каналом в рассеянном поле. а/ Сброс поля в канале $\Delta B = 0,2$ Т. б/ Сброс поля в канале $\Delta B = 0,4$ Т.

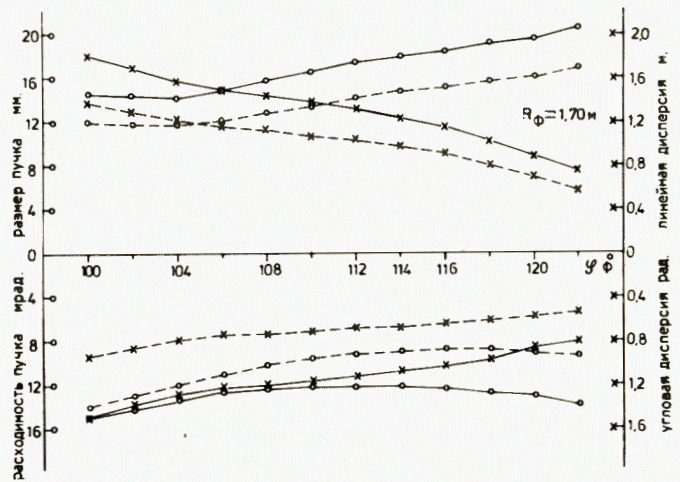


Рис. 7а/1/

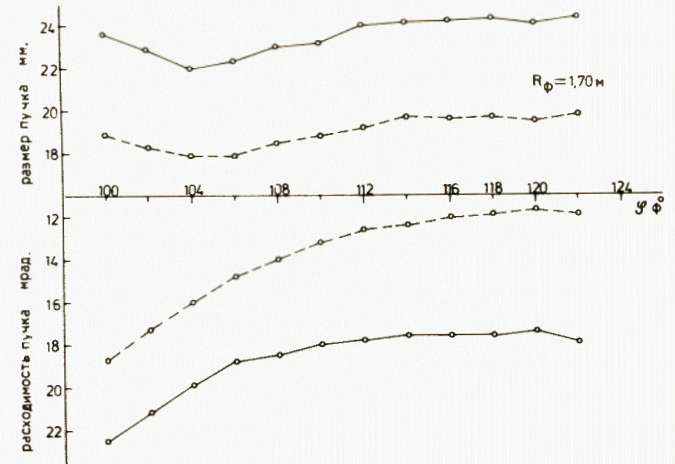


Рис. 7б/1/

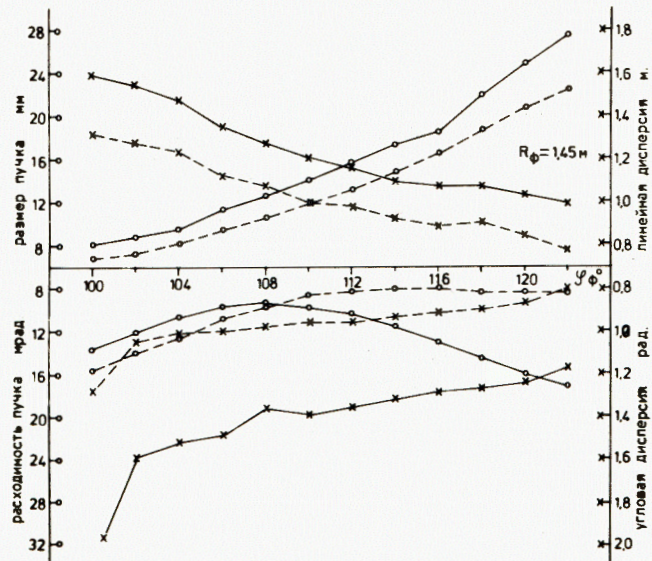


Рис. 7а/2/

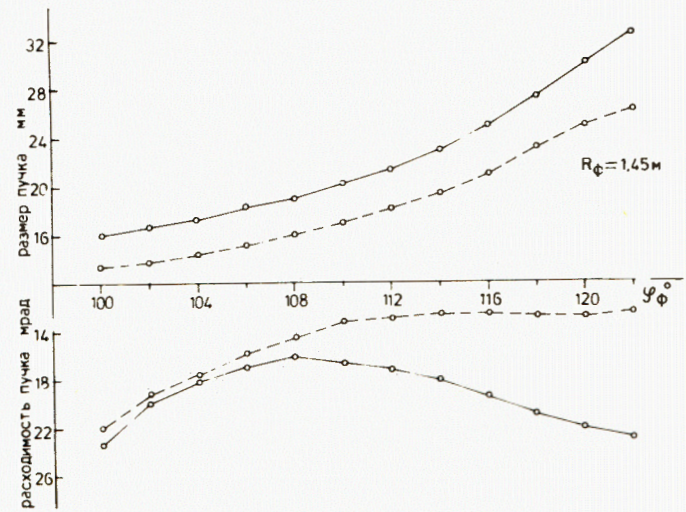


Рис. 7б/2/

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментальной части работы проведены измерения характеристик пучков ионов, выводимых из циклотрона У-400. Измерения проводились с помощью сканирующего пробника с вертикальной измерительной иглой /его положение в камере циклотрона показано на рис.5/.

На рис.8 представлена зарядовая структура и положение на пробнике выведенных пучков ионов ^{22}Ne и ^{55}Mn при двухоборотном выводе с радиуса $R=1,50$ м. Горизонтальный размер пучка для основного интенсивного пика составляет ~ 12 мм для ^{22}Ne и 15 мм - для ^{55}Mn . Разделение соседних зарядов находится в пределах 20-70 мм для ^{22}Ne и около 25 мм - для ^{55}Mn . На этом же рисунке представлена структура пучка ионов ^{22}Ne , полученная при однооборотном выводе с радиуса $R=1,70$ м. Как видно из рисунка, горизонтальный размер пучка увеличивается до 30 мм. Это объясняется тем, что при однооборотном выводе длина траектории ионов в рассеянном поле циклотрона и горизонтально-дефокусирующий градиент выше, чем при двухоборотном.

На рис.9 представлены характерные зависимости интенсивности и положения выведенных на сканирующий пробник пучков от азимутального положения фольги для ионов $^{16}\text{O}^{+2}$ и $^{22}\text{Ne}^{+3,+9,+10}$. Из рис.8 и 9 видно, что для однооборотного вывода интенсивность пучков монотонно увеличивается при увеличении азимута фольги от середины долины к сектору, и, вероятно, имеет максимум где-то в секторе. Для двухоборотного вывода максимум интенсивности для указанных ионов приходится на диапазон азимутов фольги $\phi_{\phi} = 112-117^\circ$, что соответствует границе долина - холм.

Сравнение реального положения пучков с расчетным, в зависимости от азимута фольги, показано на рис.10.

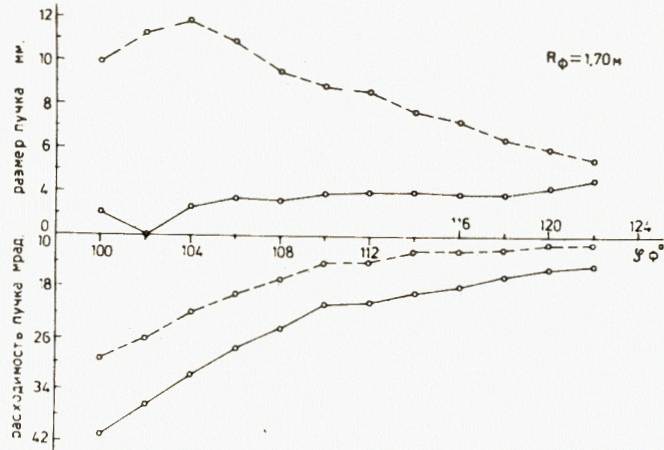


Рис. 7в/1/

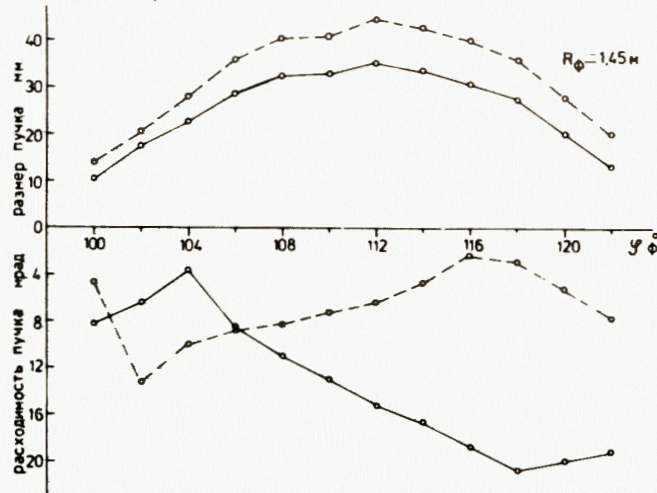


Рис. 7в/2/

Рис.7. Зависимости основных параметров пучка на входе в ионопровод /радиус $R=2,60$ м/ от азимута обдирочной фольги при однооборотном выводе с радиуса $R_{\phi}=1,70$ м и двухоборотном с радиуса $R_{\phi}=1,45$ м ионов с $A/Z=7,33$ и $q=3,00$. Пунктиром показано действие канала: а/ линейный размер и угловая расходимость, а также линейная и угловая дисперсия для радиального движения; б/ линейный размер и угловая расходимость с учетом дисперсии для радиального движения при $\Delta P/P = 0,5\%$; в/ линейный размер и угловая расходимость для аксиального движения.

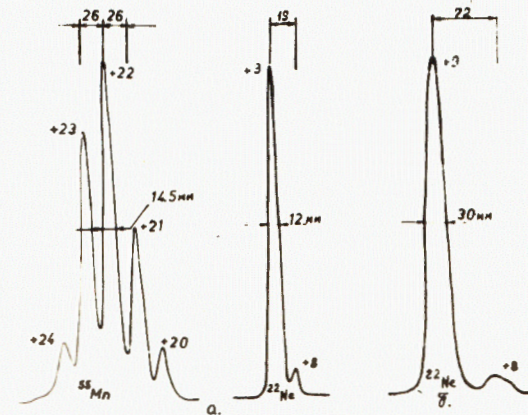


Рис.8. Зарядовая структура пучков ионов на сканирующем пробнике: а/ ^{22}Ne и ^{55}Mn при двухоборотном выводе с радиуса $R=1,50$ м, $\phi_{\phi}=120^\circ$; б/ ^{22}Ne при однооборотном выводе с радиуса $R=1,70$ м, $\phi_{\phi}=122^\circ$.

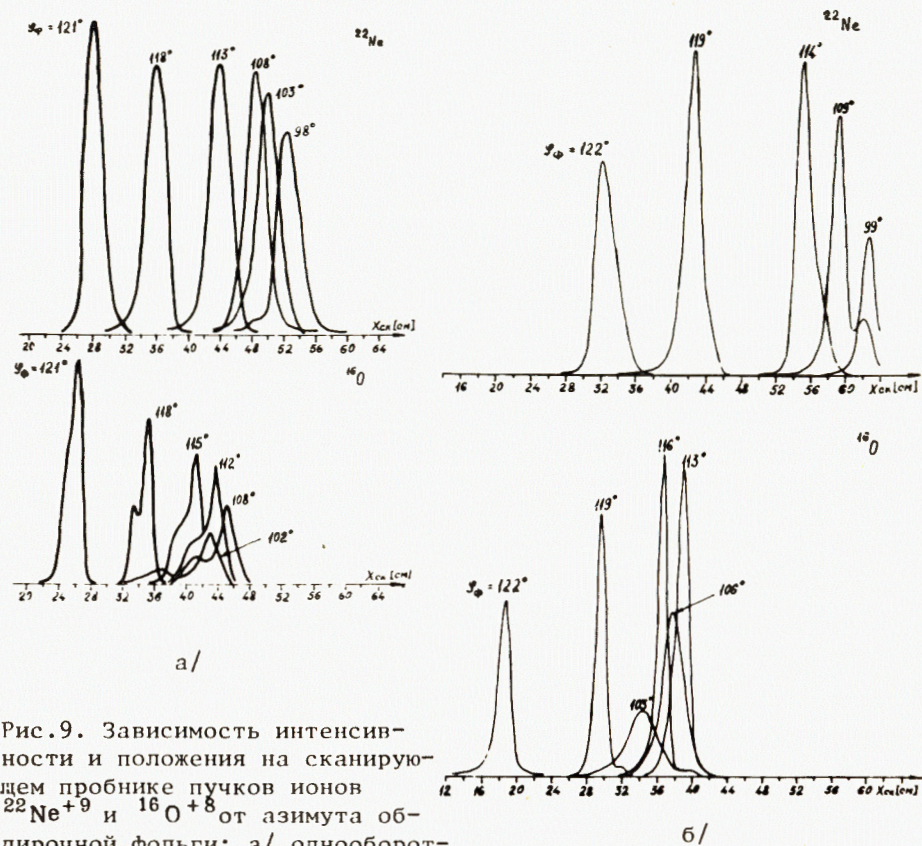


Рис.9. Зависимость интенсивности и положения на сканирующем пробнике пучков ионов $^{22}\text{Ne}^{+9}$ и $^{16}\text{O}^{+8}$ от азимута обдирочной фольги: а/ однооборотный вывод с радиуса $R=1,70$ м, б/ двухоборотный вывод с радиуса $R=1,45$ м.

Наблюдаемый коэффициент вывода составляет для ^{22}Ne и ^{16}O величину ~90%. Для более тяжелых ионов ^{40}Ar , ^{55}Mn и других этот коэффициент уменьшается до /30-40%/, вследствие дисперсии по зарядам.

Таким образом, проведенные исследования позволили:

- оптимизировать систему вывода ионов из циклотрона У-400 в направлении экспериментального зала и получить пучки высоких интенсивностей на физических мишенях.
- указать пути расширения диапазона ионов и энергий, транспортируемых к физическим установкам, применительно к У-400.
- экспериментально показать и подтвердить расчетом то, что вывод с конечных радиусов /1,70-1,75/ м ограничен, в основном, высоким коэффициентом обдирки на графитовых фольгах, который, в принципе, можно понизить, используя обдирку пучков ионов на газовых струях /8/ или фольгах из тяжелых материалов /9/.

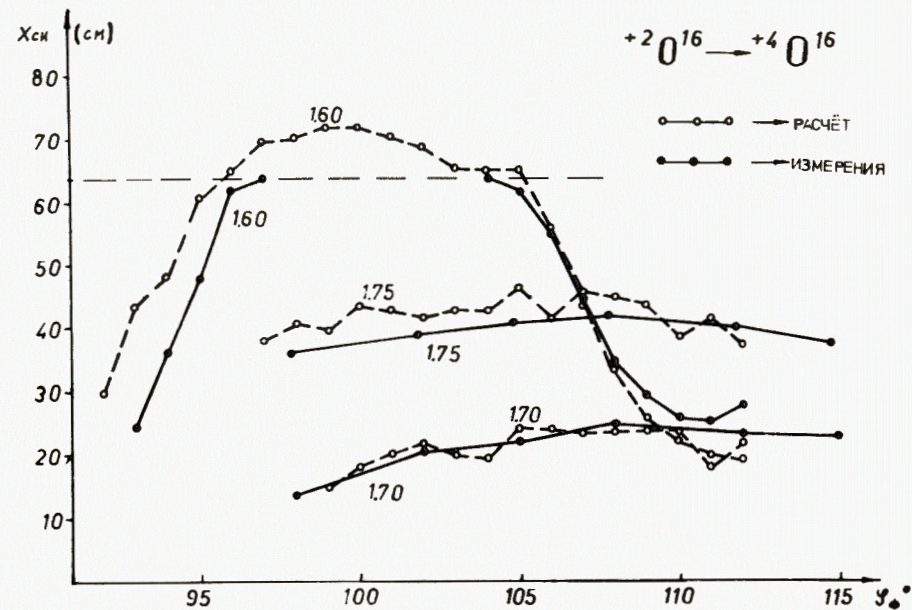


Рис.10. Сравнение расчетного и измеренного положения на сканирующем пробнике выведенных пучков ионов ^{16}O . Пунктирная линия соответствует максимальному внешнему положению пробника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вялов Г.Н. и др. ОИЯИ, 1884, Дубна, 1964.
2. Oganessian et al. C.R. ACAD.Sc.Paris, 1966 t. 262, Serie B, p. 1359-1362.
3. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, P9-4831, Дубна, 1969.
4. Кленин Б.А. и др. ОИЯИ, 9-10652, Дубна, 1977.
5. Оганесян Ю.Ц. и др. ОИЯИ, 9-11993, Дубна, 1978.
6. Sura Yu. No. 1836/XXV/PL/A, Inst. for Nuclear Research, Warszawa, 1979.
7. Бакевич Э. ОИЯИ, 9-81-532, Дубна, 1981.
8. Erb W. GSI-P-7-78, october, Darmstadt, 1978.
9. Franzke B. GSI-Scientific Report, March, Darmstadt, 1983, p. 162.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 августа

Гульбемян Г.Г., Мордуев А.М.

9-84-480

Исследование вывода пучков ионов методом обдирки из циклотрона У-400

Проведено исследование параметров системы вывода ионов из циклотрона У-400 методом обдирки электронов на мишенях. Рассчитаны зависимости положения, направления и размеров выведенного пучка от радиуса вывода, от азимутального положения обдирочной фольги и коэффициента обдирки. Показаны возможности расширения диапазона частиц и энергий, выводимых в ионопровод путем установки экранирующих каналов и корректирующих магнитов вдоль траектории пучка.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Gulbekian G.G., Morduev A.M.

9-84-480

Investigation of Ion Beam Extraction out of the U-400 Cyclotron by the Stripping Method

The extraction out of the U-400 cyclotron and transport of ions in a wide energy range along the same ion channel are investigated. The approximation of radial distribution of the cyclotron magnetic field by polynoms using the least square method is used in the calculation programs of extraction parameters. Sizes, position of centres of extracted beams and direction of ion velocity vectors versus foil azimuth are determined. The calculations were carried out for stripping coefficients 3; 3.5; 4 within the 1.40-1.75 m range of extraction radii. The effect of correcting magnets, compensating and focusing channels on the extraction efficiency is investigated. The theoretical and experimental results are compared. The investigations performed permit to optimize the system of ion extraction out of the U-400 cyclotron and point out the ways of widening the range of ions and energies transported to physical installations.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984