

С 345Г

12/11 e

A-591

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P-2693



В.С. Алфеев, Г.Н. Вялов, А.Ф. Линев,  
В.Н. Покровский, В.А. Савельев, В.Н. Титов,  
В.А. Чугреев, И.А. Шелаев

ВЫВОД ПУЧКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ  
ИЗ 310-СМ ЦИКЛОТРОНА ОИЯИ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

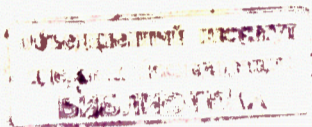
1966

P-2693

4271 / 1 пр.

В.С. Алфеев, Г.Н. Вялов, А.Ф. Лиев,  
В.Н. Покровский, В.А. Савельев, В.Н. Титов,  
В.А. Чугреев, И.А. Шелаев

ВЫВОД ПУЧКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ  
ИЗ 310-СМ ЦИКЛОТРОНА ОИЯИ



## 1. В в е д е н и е

310-см циклотрон Объединенного института ядерных исследований<sup>/1,2/</sup> является специальным ускорителем, предназначенным для получения интенсивных пучков тяжелых ионов.

Циклотрон имеет параметры:

диаметр полюсных наконечников электромагнита - 310 см;  
 напряженность магнитного поля (Н) - 16,7 кэрст;  
 спад поля в области конечного радиуса ( $R_k = 138$  см) - 1,5 %;  
 энергия ускоряемых ионов -  $250 Z^2/A$  Мэв;  
 (Z - зарядовое число, A - массовое число иона);  
 диапазон волн радиочастотного генератора - 50-100 м;  
 ускоряющее напряжение между дуантами - 300 кв;  
 рабочее давление в камере ускорителя -  $1,0 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.;  
 расход газа в ионном источнике - (1,5-2) см/мин.

Запуск ускорителя был осуществлен в 1960 году. В течение ряда лет после запуска циклотрона работа проводилась только на внутреннем пучке. Энергия и интенсивность внутреннего пучка для некоторых ионов показаны в таблице.

	В <sup>+2</sup> 10	O <sup>+3</sup> 16	Ne <sup>+4</sup> 22	Ar <sup>+7</sup> 40
Е Мэв	100	140	170	300
* Частич сек $\times 10^{13}$	30	18	7	0,4

Первые попытки вывести пучок из камеры ускорителя были предприняты в начале 1962 года. Использовался двухступенчатый электростатический дефлектор, отсекающий зуб которого находился на расчетном радиусе 138 см. Для отклонения ускоренных

ионов согласно расчету требовалось напряжение на дефлекторе до 150 кв<sup>1/</sup>. Испытания показали, что предельное напряжение, которое может быть получено в реальных условиях, не больше 80 кв. С другой стороны, эффективный рабочий радиус циклотрона, на котором интенсивность пучка была достаточно большой, достигал не более 125 см (см. рис. 1). Таким образом, для осуществления вывода пучка необходимо было решить по крайней мере две проблемы:

- 1) увеличить эффективный радиус ускорителя;
- 2) увеличить электрическую прочность дефлектора, либо снизить отклоняющее напряжение.

Эти проблемы оказались достаточно сложными. Для их окончательного решения потребовалось около четырех лет. Система вывода была полностью пересмотрена. Проектированию отдельных узлов предшествовали расчеты, моделирование и испытание макетов в рабочих условиях на полутораметровом циклотроне<sup>4,5,8/</sup>.

При выборе способа получения высоких отклоняющих потенциалов большие надежды возлагались на высокочастотный вывод<sup>8,7/</sup>. Предполагалось, что вынос дефлектора из полости дуанта существенно увеличивает продольные относительно магнитного поля зазоры. При этом электрическая прочность должна возрасти. Однако в дальнейшем мы убедились в том, что известное соотношение  $VE = \text{const}$  оказывается справедливым вне зависимости от ориентации зазора в магнитном поле. Например, при малом зазоре пластина-дуант создает сильное электрическое поле, вызывающее электронную эмиссию с поверхности дуанта. Под действием ускоряющего напряжения, приложенного к дуанту, возникает разряд на плакировку камеры. Величина зазора камера-дуант не имеет существенного значения, так как разряд развивается благодаря сильному электрическому полю в зазоре пластина-дуант.

Таким образом, увеличение продольных относительно магнитного поля зазоров не приводит к желаемому увеличению электрической прочности конструкции. Кроме того, эффективная азимутальная протяженность высокочастотного дефлектора, в отличие от статического, ограничена фазовыми соотношениями.

В дальнейших разработках было отдано предпочтение электростатической системе вывода.

## 2. Увеличение эффективного радиуса ускорения

Известно, что увеличение эффективного радиуса ускорения в классическом циклотроне может быть достигнуто уменьшением спада магнитного поля, увеличением ускоряющего напряжения и расширением области фазового движения сгустка ионов.

При ускоряющем напряжении между дуантами около 300 кв пучок достигал радиуса 125 см. Из-за больших фазовых потерь лишь незначительная часть ускоряемых ионов достигала конечного радиуса 138 см.

Спад поля на радиусе 138 см составляет величину 1,5%. Дальнейшее уменьшение спада приводит к потерям интенсивности пучка за счет вертикальной дефокусировки.

Из-за высокой разрушающей способности тяжелых ионов при бомбардировке поверхности материалов в первоначальном варианте вытягивающую линзу пришлось по возможности упростить и придать ей форму "дужки". Моделирование и расчеты /8/ показали, что для расширения области фазового движения более выгодной является шелевая линза. Применение шелевой линзы дает выигрыш в фазовом движении примерно на  $8-12^\circ$  (рис. 2), что является достаточным для достижения конечного радиуса без увеличения ускоряющего напряжения.

Шелевая линза под воздействием интенсивной бомбардировки ионами различной зарядности (суммарный по всем зарядам ток, инжектируемый из источника, достигает 0,20 а) быстро разрушается. Испытания различных конструкций шелевых линз показали, что наиболее надежной является линза, лицевая сторона которой усилена молибденовой накладкой толщиной 4 мм. Линза, изготовленная таким образом, имеет срок службы около 1000 часов (рис. 3).

С целью повышения электрической прочности ускоряющей системы были изготовлены новые дуанты и частично изменена плакировка камеры. Более жесткие каркасы позволили избежать провисания дуантов и сохранить постоянство и равномерность зазоров. Большое внимание уделено изготовлению медных плакировок дуантов и камеры. По возможности поверхность делалась гладкой, без ребер жесткости, винтов и сварных швов. Радиусы закругления выбирались допустимо большими.

В силу форсированного режима в циклотроне всегда имелись электрические разряды, частота которых достигала  $(1-2)\frac{1}{\text{сек}}$ . Были предприняты попытки уменьшить число пробоев графитизацией ускоряющих элементов (дуант, камера и др.). Однако существенных изменений при этом не наблюдалось.

На рис. 1 показана зависимость интенсивности внутреннего пучка от радиуса до и после изменения начальной оптики и ускоряющей системы циклотрона.

### 3. Электростатический дефлектор

С целью уменьшения отклоняющего напряжения направление вывода пучка из камеры циклотрона было изменено на  $12^\circ$ , и начало дефлектора приближено к оси резонансных линий на  $13^\circ$  (рис. 4).

Измерения радиального размера пучка на радиусе 138 см показали, что ширина пучка обычно не превышает 5 мм. Это позволило уменьшить входной зазор дефлектора, не уменьшая его прозрачности.

Изменения направления вывода пучка, смещение начала дефлектора и уменьшение входного зазора дефлектора позволили снизить требуемое отклоняющее напряжение до (50-60) кв.

Конструктивно отклоняющая система выполнена в отдельном алюминиевом каркасе, положение которого внутри дуанта регулируется без нарушений вакуума (рис. 5). Поверхность каркаса, расположенная под внешней пластинной дефлектора, покрыта листами из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм. Начальный участок дефлектора с плоским профилем пластин и расходящимся зазором, второй участок - гиперболический профиль с постоянным зазором и третий участок - гиперболические пластины с увеличенным зазором. Угловая протяженность дефлектора  $108^{\circ}$ . Входной зазор 8 мм, выходной - 22 мм. Начальный участок внутренней пластины молибденовый с продольным вырезом. Внешняя пластина укреплена на трех керамических изоляторах цилиндрической формы.

#### 4. Магнитные каналы

После выхода из дефлектора (рис. 6) пучок, проходя неоднородное магнитное поле, имеет значительную угловую расходимость в горизонтальной плоскости. При достижении входа в ионопровод ширина пучка может превосходить апертуру ионопровода, а центр его распределения не совпадает с осью ионопровода. Коэффициент вывода при этом снижается и становится неустойчивым из-за ухода положения дефлектора и дуанта. Для уменьшения угловой расходимости пучка и согласования направления пучка с осью ионопровода применяется магнитный канал с фокусировкой<sup>/8/</sup>. Канал состоит из трех стальных брусков сечением  $20 \times 80 \text{ мм}^2$ , расположенных симметрично относительно медианной поверхности. Бруски расположены в зазоре магнита циклотрона таким образом, что формируется обратный, по отношению к основному полю, градиент, обладающий свойствами горизонтальной фокусировки. Внешний вид канала показан на рис. 7.

Ионный пучок, выходящий из дефлектора, подхватывается магнитным каналом и выходит на ось резонансных линий хорошо сфокусированным. Степень фокусировки подбирается величиной обратного градиента магнитного канала.

Радиальный размер пучка на оси резонансных линий на радиусе 200 см имеет ширину не более 6 см и незначительную угловую расходимость (рис. 8).

Положение фокусирующего магнитного канала и дефлектора регулируется независимо, без нарушения вакуума. Канал установлен в непосредственной близости от выхода дефлектора. Уход положения дуанта и отклоняющей пластины не приводит к заметному изменению согласования направления пучка с осью ионопровода, так как направление входа в ионопровод определяется положением фокусирующего магнитного канала.

Перед выходом пучка из камеры ускорителя установлен дополнительный магнитный канал, ослабляющий уровень магнитного поля у входа в ионопровод до 3 кэрст.

Благодаря использованию фокусирующего и дополнительного магнитных каналов удается провести пучок от дефлектора до первых линз ионопровода практически без потерь. Основные потери имеютсЯ при прохождении дефлектора. Они составляют величину порядка 0,5.

### 5. Трассировка выведенного пучка

Оптимальная величина коэффициента вывода подбирается положением дефлектора, фокусирующего магнитного канала и токами двух азимутальных катушек.

Выведенный пучок трассируется по ионопроводу с апертурой 220 мм в бетонные кабины, удаленные от центра циклотрона на расстояние 15–25 м. Для поворота пучка в пределах  $\pm 70^\circ$  используется магнит типа СП-105 и СП-57. Схема разводки пучков показана на рис. 6.

Фокусировка пучка в ионопроводе осуществляется квадрупольными линзами типа 2МЛ-5-2, МЛ-8, МЛ-17 с градиентом магнитного поля  $500 \frac{\text{эрст}}{\text{см}}$ . Размер пучка, сфокусированного на конце ионопровода, не более  $1 \text{ см}^2$ . На всех отводах ионопровода имеются шиберы, пробники для измерения тока, ограничительные диафрагмы, вакуумные насосы. Все оборудование имеет дистанционное управление с главного пульта циклотрона. Форма и положение пучка на конце ионопровода наблюдаются по свечению кварцевой пластины при помощи телевизионной установки типа ПТУ-2. Энергия выведенного пучка ускоренных ионов измерялась полупроводниковыми детекторами. Перед тем как попасть на детектор, ионы рассеиваются на тонкой платиновой фольге. Энергетические спектры ионов показывают, что монохроматичность пучка не хуже 1,5%.

### З а к л ю ч е н и е

1. Ускорение и вывод пучка тяжелых ионов обладают рядом особенностей. Так как удельный заряд ионов существенно меньше единицы, то для получения одной и той

же энергии на нуклон (при одинаковом магнитном поле) геометрические размеры циклотрона должны расти пропорционально  $A/Z$ . Если траектории отклоненных ионов подобны, то при одинаковой напряженности электрического поля длина дефлектора также растет пропорционально  $A/Z$ . В связи с этим для сохранения прозрачности требуется увеличить апертуру дефлектора и, соответственно, отклоняющий потенциал.

2. Уменьшение амплитуды радиальных колебаний ионов внутри циклотрона и применение дефлектора с неоднородным электрическим полем позволили получить высокую прозрачность при относительно небольших апертурах.

3. При конструировании начальной оптики следует иметь ввиду высокую разрушительную способность тяжелых ионов, которая существенно снижает долговечность бомбардируемых деталей.

4. Использование фокусирующих магнитных каналов в системе вывода пучка тяжелых ионов оказалось очень эффективным. Примерно в три раза повышается коэффициент прохождения пучка от дефлектора до системы трассировки пучка. Улучшается сопряжение траектории выведенного пучка с осью ионопровода.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить члена-корреспондента АН СССР Г.Н. Флерова за постоянный интерес к работе, В.И. Данилова за помощь, оказанную при проектировании магнитных каналов, Б.А. Загера и А.Н. Филиппона за участие в наладке системы вывода, а также сотрудников конструкторского бюро и механических мастерских, без участия которых было бы невозможным выполнение такой трудоемкой работы.

#### Л и т е р а т у р а

1. Материалы конференции по ядерным реакциям с многозарядными ионами. Препринт ОИЯИ Р-374, Дубна 1959 г., стр 147-183.
2. Ю.Ц. Оганесян. "Получение пучков ускоренных ионов на 300-см циклотроне ОИЯИ". Доклад на Международном совещании по циклотронам в Кракове, 1961.
3. Г.Н. Флеров, В.А. Карнаухов. Препринт ОИЯИ Д-1798, Дубна 1964 г.
4. Г.Н. Вялов. Диссертация ОИЯИ, Дубна 1965.
5. В.В. Батюня, Бай Фу-вэй, Г.Н. Вялов, Б.А. Загер, А.Ф. Лиев. Атомная энергия, 18, вып. 4, стр. 384 (1966).
6. Ю.Ц. Оганесян, Г. Индреаш. Препринт ОИЯИ Р-1507, Дубна 1964.
7. Дж. Ливингуд. Принципы работы циклических ускорителей. ИИЛ 1963 г., стр. 161.
8. Г. Индреаш, И.А. Шелаев. Препринт ОИЯИ 2164, Дубна 1965.
9. В.И. Данилов, Б.А. Загер, А.Ф. Лиев, И.А. Шелаев. "Магнитный канал для фокусировки отклоненного пучка циклотрона". Препринт ОИЯИ 2588, Дубна 1966.





Рис. 1. Зависимость тока конов (относительные единицы) от эффективного радиуса ускорения, 1 - щелевая начальная оптика, 2 - начальная оптика в виде дужки.

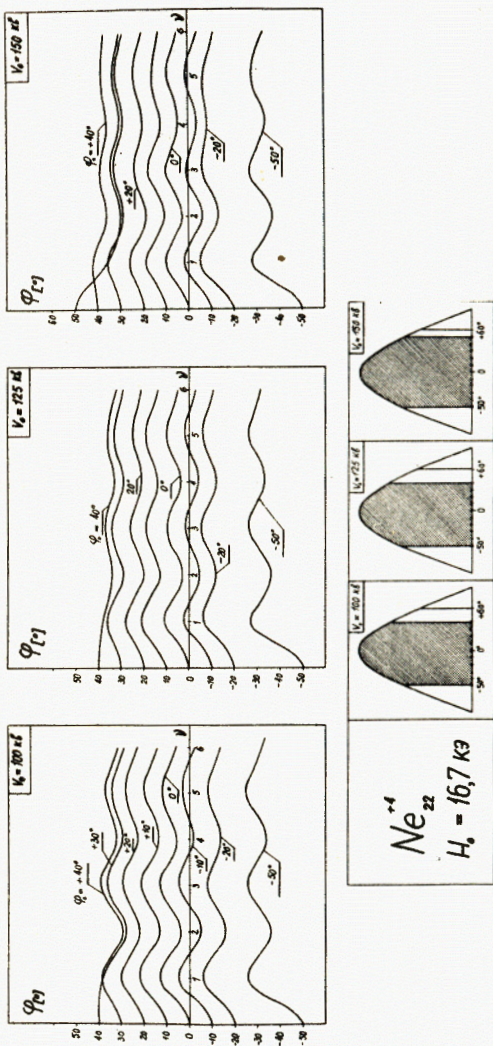


Рис. 2а). Изменение фазы ионов  $\varphi$  с числом ускорений  $\nu$ ; правая начальная оптика.

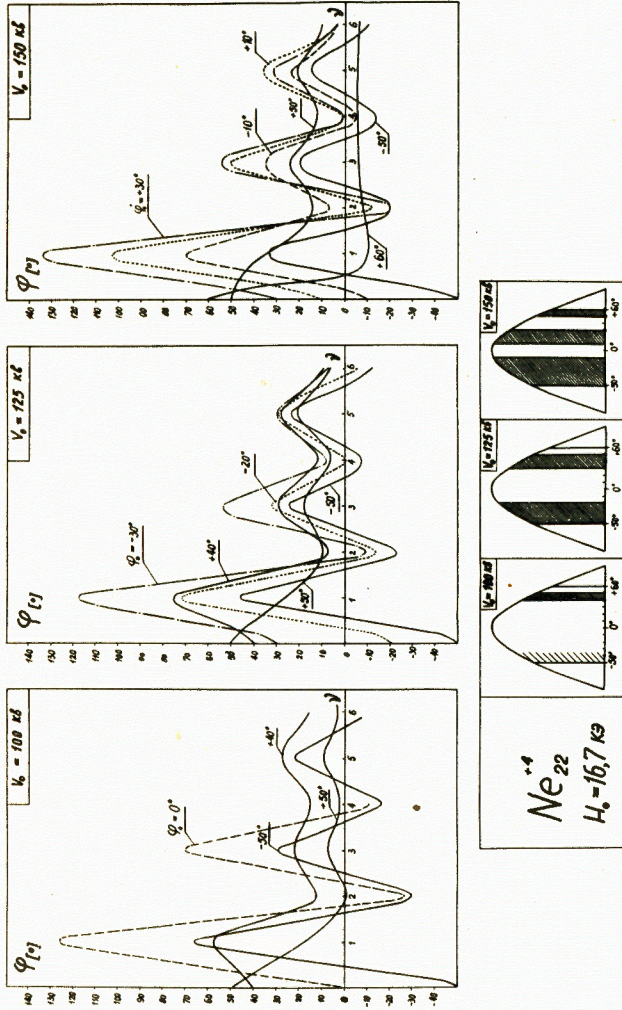


Рис. 26). Изменение фазы ионов  $\varphi$  с числом ускорений  $\nu$ ; начальная оптика в виде дужки.

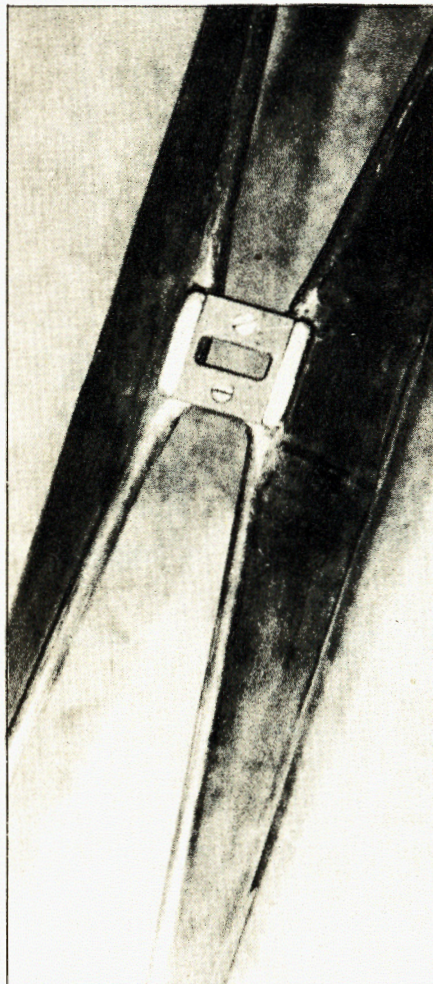


Рис. 3. Начальная оптика.

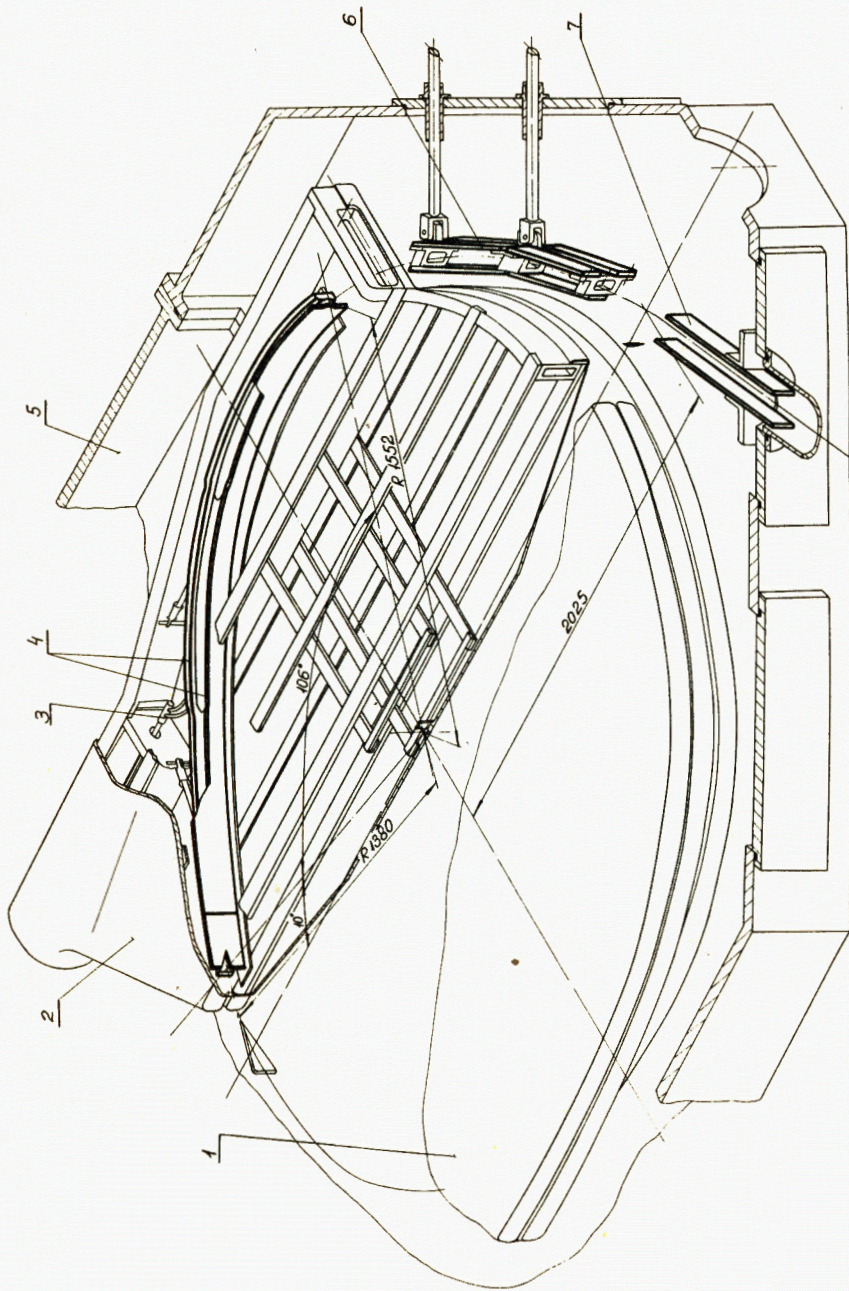


Рис. 4. Схема вывода пучка: 1, 2 - диафрагмы, 3 - высоковольтный ввод, 4 - пластины дефлектора, 5 - вакуумная камера, 6 - фокусирующий магнитный канал, 7 - внешний магнитный канал.

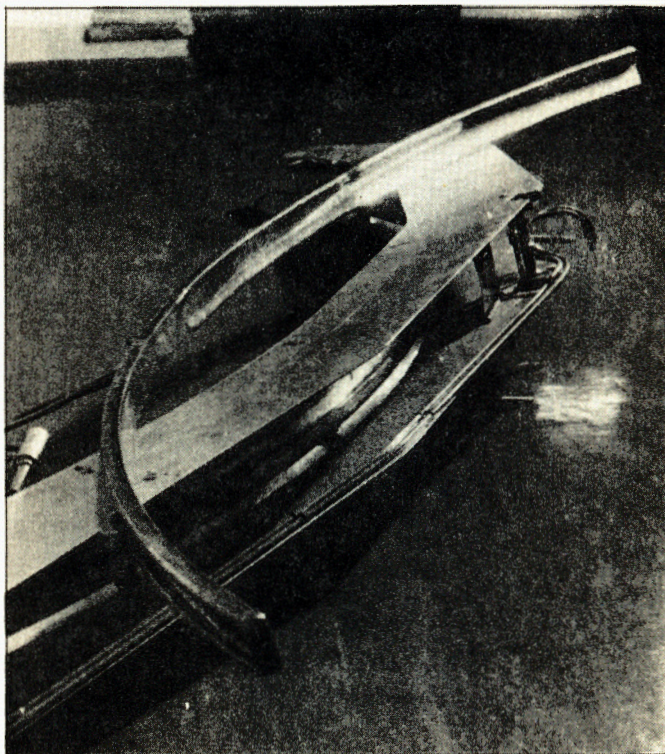


Рис. 5. Электростатический дефлектор.

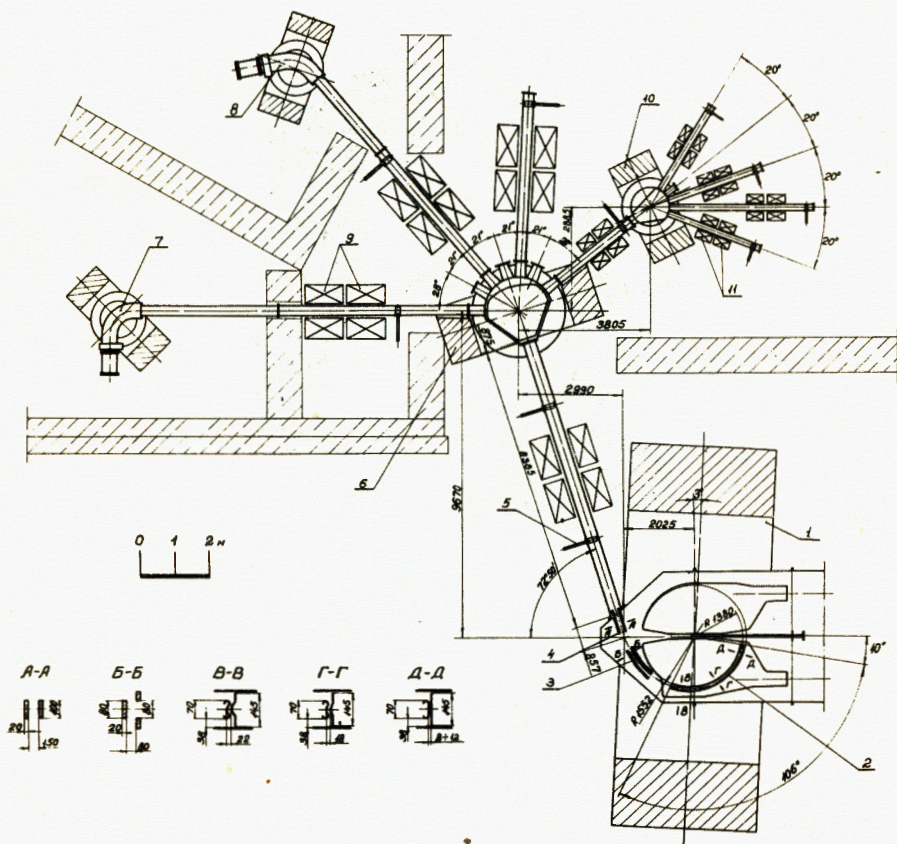


Рис. 6. Схема вывода и трассировки пучка: 1 - магнит циклотрона, 2 - дефлектор, 3, 4 - магнитные каналы, 5 - пробник, 6, 10 - поворотные магниты, 7, 8 - экспериментальное оборудование, 9, 11 - квадрупольные линзы.

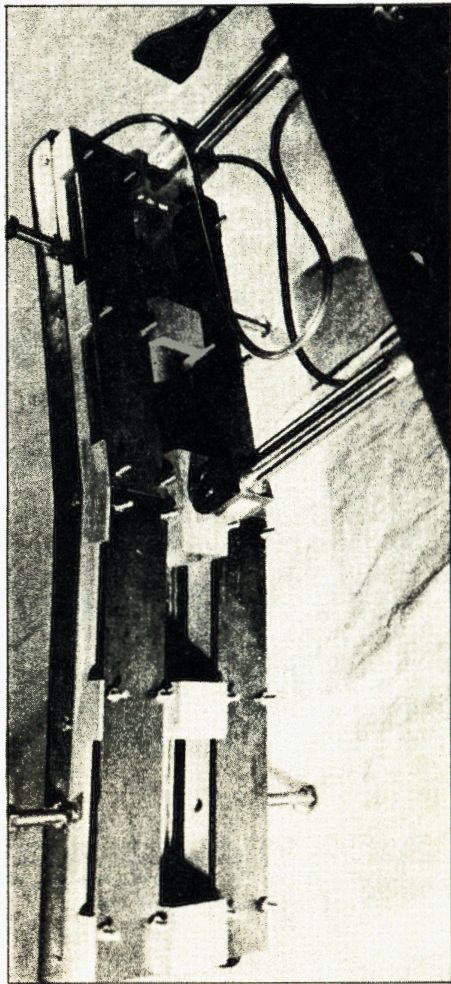
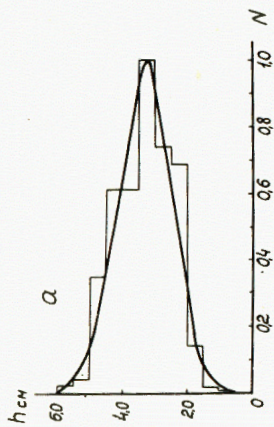


Рис. 7. Фокусирующий магнитный канал.



1



2

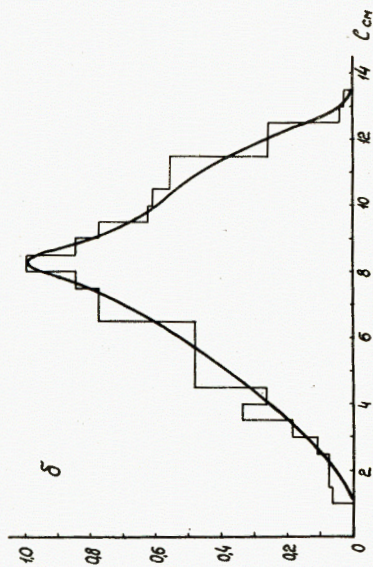
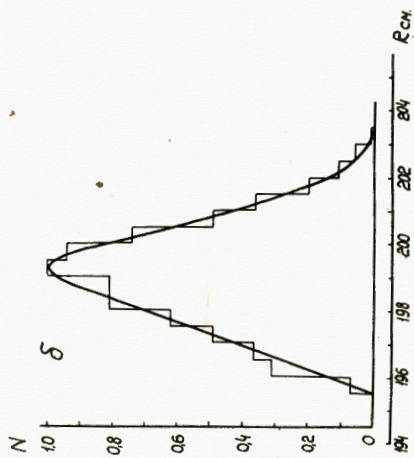
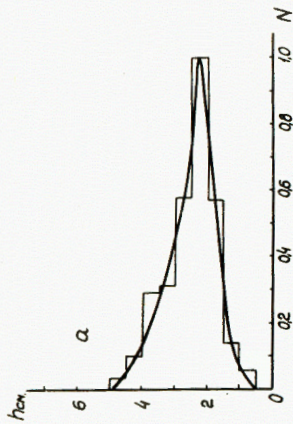


Рис. 8. Вертикальное (а) и горизонтальное (б) распределения пучка, измеренные по активации алюминиевой фольги. 1 - на резонансной линии, 2 - на первом пробнике в монопрободе.