

С345 К

Б-289

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1858



В.В. Батюня, Бай Фу-вэй, Г.Н. Вялов,  
Б.А. Загер, А.Ф. Линев

ПЕРЕСТРОЙКА ПОЛУТОРАМЕТРОВОГО  
ЦИКЛОТРОНА В РЕЖИМ УСКОРЕНИЯ  
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

*Атомная энергия,  
1965, т 18, в. 4, с. 384.*

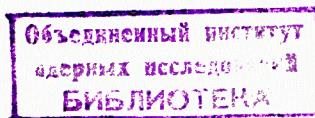
ЛБОРATORIЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

1964

2803/2 48  
B.B. Батюня, Бай Фу-вэй, Г.Н. Вялов,  
Б.А. Загер, А.Ф. Линев

ПЕРЕСТРОЙКА ПОЛУТОРАМЕТРОВОГО  
ЦИКЛОТРОНА В РЕЖИМ УСКОРЕНИЯ  
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Направлено в журнал "Атомная энергия"



## Введение

Серийный полупораметровый циклотрон  $У - 150^{1/}$  по проекту предназначен для ускорения дейтонов и  $\alpha$ -частиц до энергии 12 Мэв/нуклон при напряженности магнитного поля  $H_0 = 14,1$  кэ. Высокочастотная система ускорителя позволяет перестройку в диапазоне волн от 18 до 35 м.

Для проведения исследований по физике ядерных реакций между сложными ядрами требуются многозарядные ионы с энергией выше кулоновского барьера, величина которого не превышает 6 Мэв/нуклон. Изучение эффектов кулоновского взаимодействия возможно и при более низких энергиях.

Кинетическая энергия иона ( $T$ ) на заданном радиусе ( $R$ ) и длина волны ВЧ-генератора ( $\lambda$ ) связаны простым соотношением:

$$T = 1.86 \frac{R^2}{\lambda^2} \text{ Мэв/нуклон,}$$

где  $\lambda$  - в метрах,  $R$  - в см. Таким образом, при конечном радиусе  $R = 66$  см для получения энергии (5-9) Мэв/нуклон необходимо иметь диапазон волн в пределах от 30 до 40 метров  $^{1/2}$ . В конструкцию циклотрона  $У - 150$  были внесены изменения, которые позволили перестроить его в режим ускорения многозарядных ионов.

### 1. Конструктивные изменения

#### Источник ионов

Используется дуговой ионный источник закрытого типа с осциллирующим потоком электронов. Плотность электронного потока достигает  $50 \text{ а/см}^2$ . Конструкция источника и схема его питания разработаны в Лаборатории ядерных реакций  $^{3/}$ . Питание источника импульсное, синхронное с ВЧ-генератором циклотрона. Мощность дугового разряда в импульсе достигает 40 квт. Расход газа, необходимый для поддержания разряда,  $(1,5 \div 5) \text{ см}^3/\text{мин}$ . Из источника могут быть получены ионы  $C_{12}^{+4}$ ,  $N_{14}^{+5}$ ,  $O_{16}^{+5}$  и др. достаточной интенсивности. Среднее время непрерывной работы источника, как показала практика эксплуатации, равно 15 - 20 часам.

#### Радиочастотная система

Для того, чтобы сместить диапазон длин волн радиочастотной системы в сторону их увеличения, зазор между крышками вакуумной камеры циклотрона был уменьшен

до 18 см. Емкость дуантов при этом возросла до 450 пф. В результате этих изменений диапазон длин волн ускоряющей системы сместился в область от 20 до 40 м.

### Магнитное поле

Шиммирование магнитного поля осуществлено при напряженности 16,7 кэ в центре магнита. Используются внутренние и внешние кольцевые шиммы, формирующие требуемый спад магнитного поля в области конечного радиуса ( $R \sim 87$  см). Для создания аксиальной фокусировки в центральной области установлены внешние дисковые шиммы  $\vartheta = 30$  см. Плавная регулировка радиального сноса осуществляется внешними радиальными катушками. Две пары азимутальных катушек, расположенных под углом  $90^\circ$ , служат для напечивания пучка на вход отклоняющей системы (рис. 1). Управление током в катушках осуществляется с пульта.

Измерения магнитного поля проводились ядерным магнитометром с выносным датчиком<sup>4/</sup>, изготовленным на основе стандартного магнитного измерителя ИМИ-2<sup>5/</sup>. Зависимость спада поля от радиуса приводится на рисунке 2.

### 2. Получение внутреннего пучка

Пусконаладочные работы на внутреннем пучке включали в себя изучение следующих характеристик:

1. Радиальный ход интенсивности пучка  $C_{12}^{+4}$ ;
2. Смещение центра орбиты относительно геометрического центра;
3. Смещение орбиты относительно медианной плоскости;
4. Радиальный заброс ионов на мишень и вертикальное распределение пучка;
5. Пусковые и резонансные кривые;
6. Влияние радиальной и азимутальной катушек на интенсивность внутреннего пучка на различных радиусах;
7. Зависимость интенсивности пучка от условий вытягивания ионов из источника;
8. Радиально-фазовые характеристики;
9. Энергия ионов;
10. Зависимость интенсивности пучка от давления в камере циклотрона.

Измерения интенсивности ионов производились интегратором постоянного тока<sup>6/</sup>.

Основными трудностями, которые пришлось преодолеть при получении интенсивного пучка с относительно небольшим спадом интенсивности по радиусу, являются смещение центра орбиты относительно центра магнита и уход пучка из медианной плоскости, связанный с нарушением юстировки дуантов.

Смещение орбиты вызывалось первой гармоникой азимутальной неоднородности магнитного поля, возникавшей из-за перекоса крышек вакуумной камеры и смещения секционных внешних кольцевых шимм. После исправления перекоса крышек и изменения системы крепления внешних шимм, их точной установки и жесткой фиксации, а также выбора оптимальной формы спада магнитного поля смещение орбиты ионов не превышает  $1 \div 2$  см при удовлетворительном радиальном ходе интенсивности (рис. 3).

Неточная установка дуантов относительно медианной плоскости приводит к попаданию пучка на дуанты, если отклонение дуанта от среднего положения достигает величины  $\pm 10$  мм.

Радиальный заброс ионов на мишень и их вертикальное распределение определялось методом активации фольг. Высота пучка в области конечных радиусов  $\sim 10$  мм. Максимальное расширение пучка на радиусе  $\sim 25$  см достигает 20 мм. Радиальный заброс ионов на мишень на конечном радиусе  $R \approx 66$  см составляет  $5 \div 6$  мм.

Радиальная катушка очень удобна для выбора оптимальной формы магнитного поля по максимуму интенсивности ионов. На конечном радиусе можно плавно изменить интенсивность пучка ионов в  $2 \div 3$  раза, меняя ток в радиальной катушке (рис. 4).

Азимутальные катушки, установленные в районе конечных радиусов, практически не влияют на ток внутреннего пучка.

В центре циклотрона использовался вытягивающий электрод в форме дужки. Положение вытягивающего электрода относительно щели источника подбиралось опытным путем на основании двух противоречивых требований:

- а) максимально приблизить электрод к щели источника, чтобы создать наибольшую напряженность электрического поля в щели, необходимую для эффективного вытягивания ионов;
- б) предохранить электрод из молибдена от попадания на него ионов из источника и от разогрева, чтобы не допустить возникновения электрического пробоя в центре.

Наилучшие условия вытягивания соответствуют поперечному и продольному расстояниям между вытягивающим электродом и щелью источника  $6 \div 7$  мм при потенциале дуанта 100  $\div$  120 кв.

Радиально-фазовые характеристики пучка рассчитывались аналитически<sup>7/</sup> и изменились на далеких радиусах методом, описанным в работах<sup>8/</sup>. Эти данные использовались при окончательном выборе уровня и формы магнитного поля и конечного радиуса ускорителя.

Энергия ионов измерялась по пробегу в фольгах и методом полупроводниковых детекторов заряженных частиц<sup>9/</sup>. Измерения полупроводниковым датчиком согласуются с расчетом энергии по известным значениям  $R$  и  $H$  с точностью  $\sim 3\%$ .

Первоначально вакуумная откачка камеры ускорителя обеспечивалась двумя насосами ВА-8-4 со скоростью откачки на фланце присоединительного патрубка без ловушек 2500 л/сек. В рабочих условиях эти насосы обеспечивали вакуум  $(2 \div 3) \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст. При таком давлении наблюдались значительные потери интенсивности пучка, которые можно объяснить перезарядкой ускоряемых ионов на остаточном газе. Кривая зависимости интенсивности пучка от давления в камере ускорителя приведена на рис. 5 и согласуется с данными, полученными в работе /10/.

Для уменьшения потерь ионов из-за перезарядки на остаточном газе был установлен еще один насос ВА-8-4 со скоростью откачки  $\sim 4000$  л/сек, что обеспечило вакуум  $\sim 1 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст. и лучше.

Рабочие параметры циклотрона указаны в следующей таблице.

Т а б л и ц а 1  
Рабочие параметры      У = 150

Зазор между крышками вакуумной камеры	- 18 см
Ток намагничивания	- 950 А
Магнитное поле в центре	- 16,7 кэ
Ускоряющее напряжение между дуантами	- $(200 \div 220)$ кв
Давление в камере	- $(0,5 \div 1) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.
Частота импульсов ионного источника	- $(50 \div 150)$ гц
Длительность импульса	- $(0,5 \div 3)$ мсек.

### 3. Вывод ионов из камеры циклотрона

Отклонение пучка осуществляется электростатическим дефлектором с неоднородным электрическим полем для компенсации дефокусирующего действия поля рассеяния магнита. Траектория отклоненного пучка и параметры дефлектора рассчитывались аналитически /11/.

Первоначально пучок ионов выводился с конечного радиуса  $R = 66$  см, предусмотренного в дейтонном варианте циклотрона. После решения главной задачи наладки циклотрона - доведения пучка до конечного радиуса, получения удовлетворительной радиальной зависимости интенсивности ионов и достаточно хорошо центрированной орбиты - пучок ионов был выведен в ионопровод при отклоняющем потенциале  $V = (70 \div 75)$  кв и коэффициенте вывода  $30 \div 40$  %.

В таком режиме отклоняющая система работала неустойчиво. При потенциале  $\sim 50$  кв и выше развивались кратковременные пробои, приводящие к сильному запылению изоляторов частицами графита и меди. Для уменьшения мощности разрядов на

входе потенциальной пластины было установлено ограничительное сопротивление  $R_2 = (5 \div 10)$  мом (рис. 6). Около изоляторов на расстоянии  $(5 \div 10)$  мм были установлены сплошные металлические шторки, предупреждающие запыление изоляторов (рис. 7). Это улучшило стабильность работы дефлектора при потенциале  $\sim (70 \div 75)$  кв.

В дальнейшем напряжение на дефлекторе было снижено до  $(40 \div 50)$  кв при сохранении того же коэффициента вывода за счет:

1) уменьшения радиальной апертуры дефлектора от 7 мм до 5  $\div$  6 мм на входе и пропорционального уменьшения на выходе с учетом данных о радиальном забросе ионов на мишень;

2) увеличения конечного радиуса (место установки отсекающего зуба) с 66 см до  $(67 \div 67,5)$  см;

3) изменения угла входа отклоняемых ионов в дефлектор с учетом того факта, что использование положительных углов входа уменьшает отклоняющее напряжение /11/.

Зависимость тока внешнего пучка  $C_{12}^{+4}$  от потенциала на дефлекторе после его снижения и плотность распределения внешнего пучка в сечении указаны на рис. 8,9.

Для индикации пучка в ионопроводе были использованы экраны из тонкого слоя люминофора (виллемита), нанесенного на прозрачные фланцы. Свечение экранов наблюдалось с помощью промышленной телевизионной установки ПТУ-2. Количественные измерения проводились пробниками и квадрантной системой из пяти изолированных электродов, установленной непосредственно на вакуумном шибере ионопровода.

Схема размещения циклотронной установки, системы коммутации пучка и экспериментального павильона приводится на рис. 10.

Параметры пучков ускоренных ионов даны в таблице 2.

Т а б л и ц а 2  
Параметры пучков ускоренных ионов

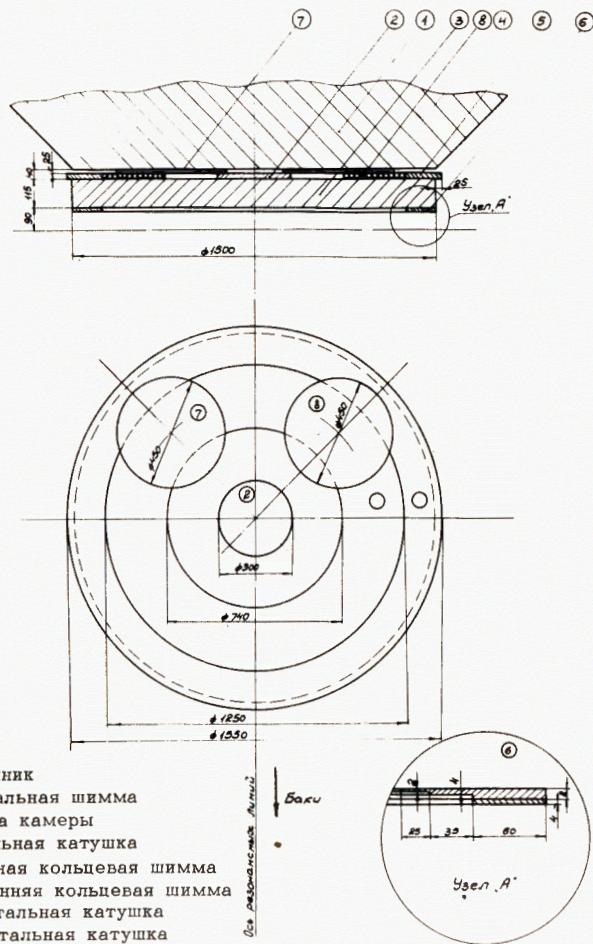
Параметр	$C_{12}^{+4}$	$N_{14}^{+5}$
Максимальный внутренний ток, $\mu A$	30	20
Максимальный внешний ток, $\mu A$	10	7
Поперечный размер пучка, $cm^2$	$\sim 1,5$	$\sim 1,5$

Энергия, МэВ	72 + 2	98 + 3
Потенциал дефлектора, кв	~ 50	~ 56
Фазовая ширина сгустка	15°	12°
Радиальный заброс на внутреннюю мишень, R ≈ 80 см (мм)	5	5

В заключение авторы благодарят члена-корреспондента АН СССР Г.Н. Флерова за постоянный интерес к работе и ряд полезных предложений по ходу ее выполнения, а также В.П. Ковалева, Ф.Т. Корощупова, Пек Ден Ги, В.В. Полова, Л. Сепа и В. Станку за помощь в проведении экспериментов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Электрофизическая аппаратура промышленного изготовления. Справочник, Госатомиздат, 1963.
2. Г. Индреаш. Диссертация ОИЯИ, Дубна, 1962.
3. А.С. Пасюк и др. ПТЭ, № 5, 23 (1963).
4. Ю.Н. Денисов. ПТЭ, № 5 (1958).
5. Л.Н. Герцигер. Приборостроение, № 5, 1959.
6. А.А. Курашов, А.Ф. Линев. ПТЭ, № 2, 70 (1957).
7. Г.Н. Вялов. Атомная энергия, т. 18, вып. 5, 442-444 (1964).
8. А.Ф. Линев. Труды пятой научно-технической конференции по ядерной электронике, ч. 1, том. II. М, Госатомиздат, 1963;
- Ю.Ц. Оганесян, А.П. Кабаченко, А.Ф. Линев. Препринт ОИЯИ, 1125, Дубна, 1962.
9. Х. Кекк, В.Л. Михеев, А.А. Плеве, Е.В. Фефилов. ПТЭ, № 4, 27 (1963).
10. А.С. Пасюк и др. Препринт ОИЯИ, 1522, Дубна, 1964.
11. В.В. Бабиков, Г.Н. Вялов, Г. Индреаш. Препринт ОИЯИ, 1480, Дубна, 1963.



Р и с. 1. Схема шиммирования магнита.

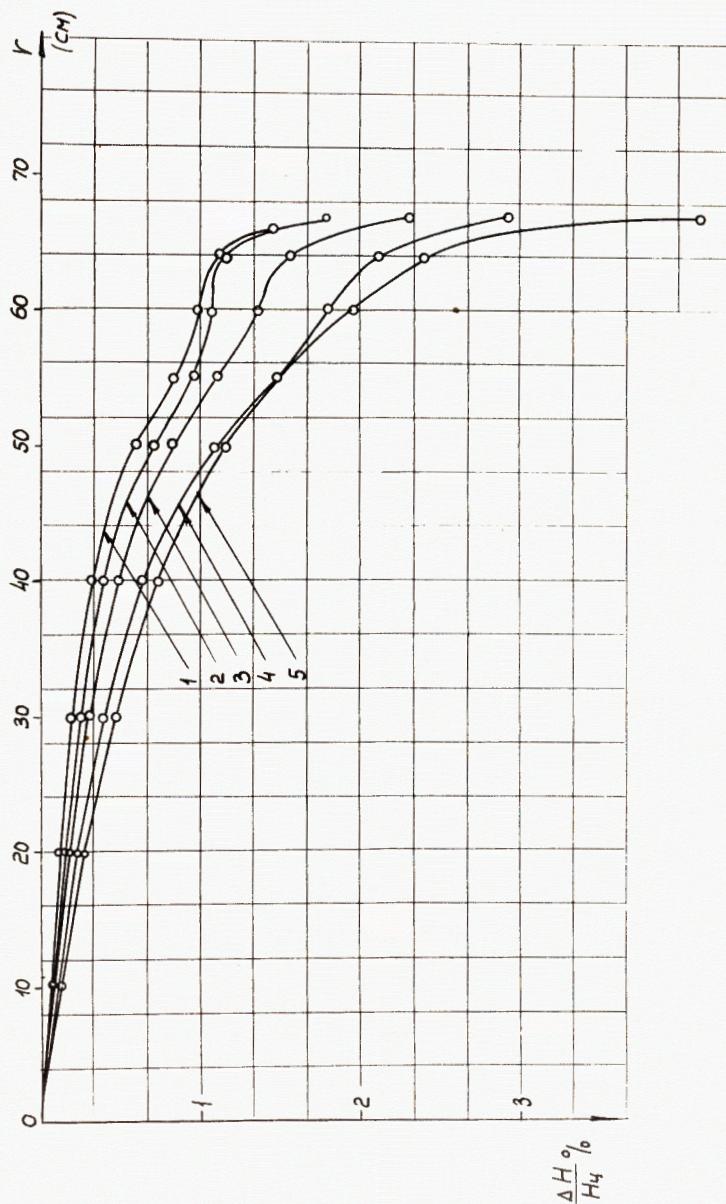
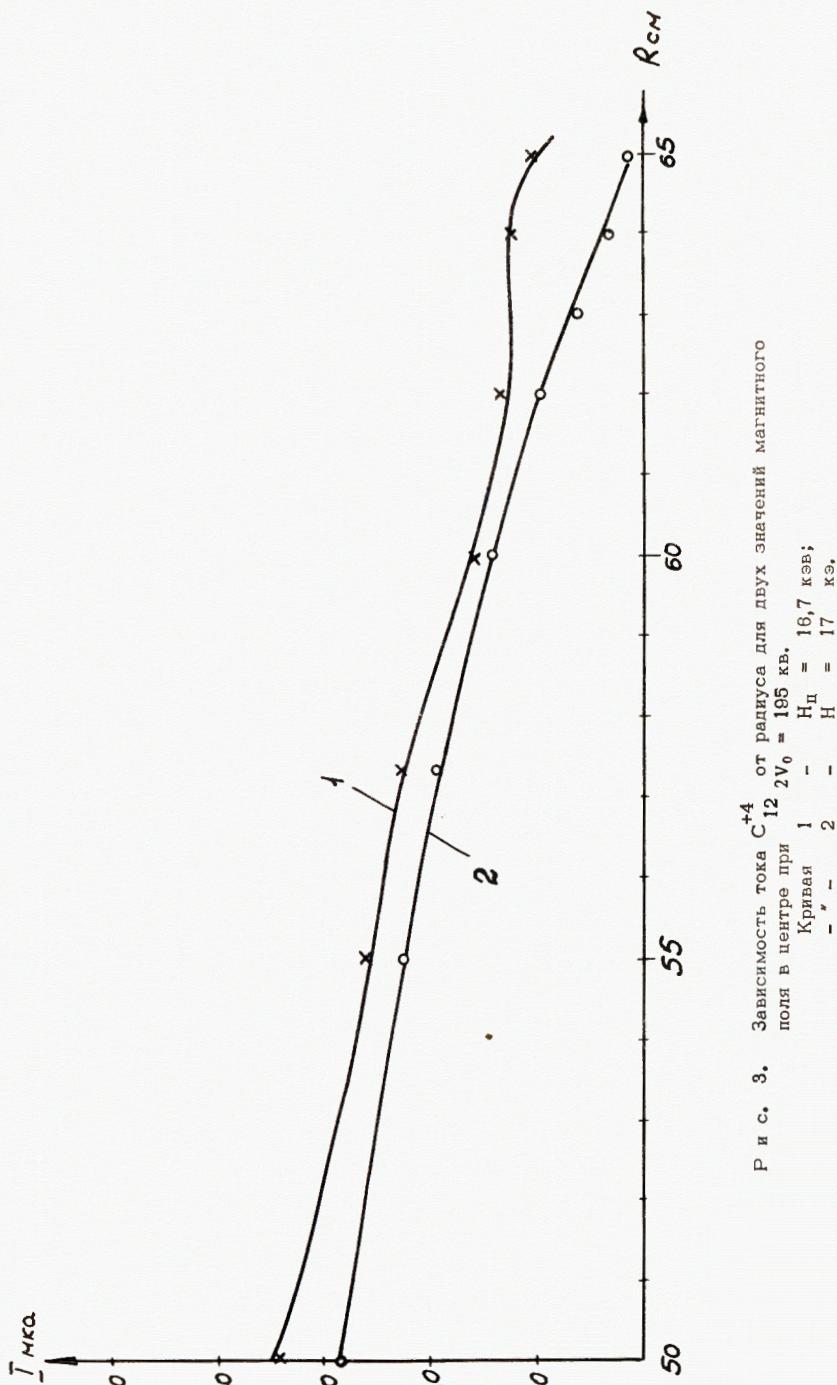
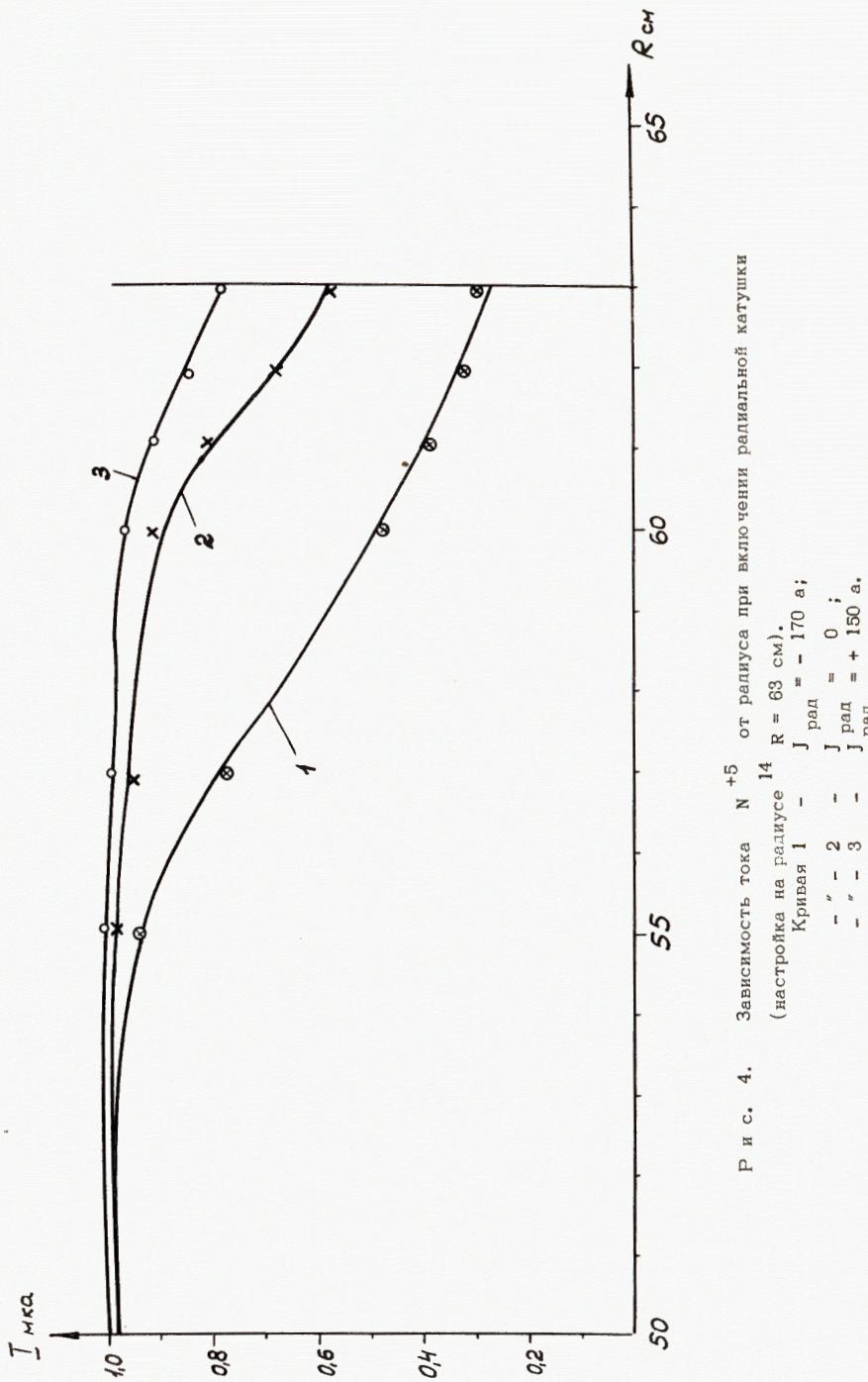


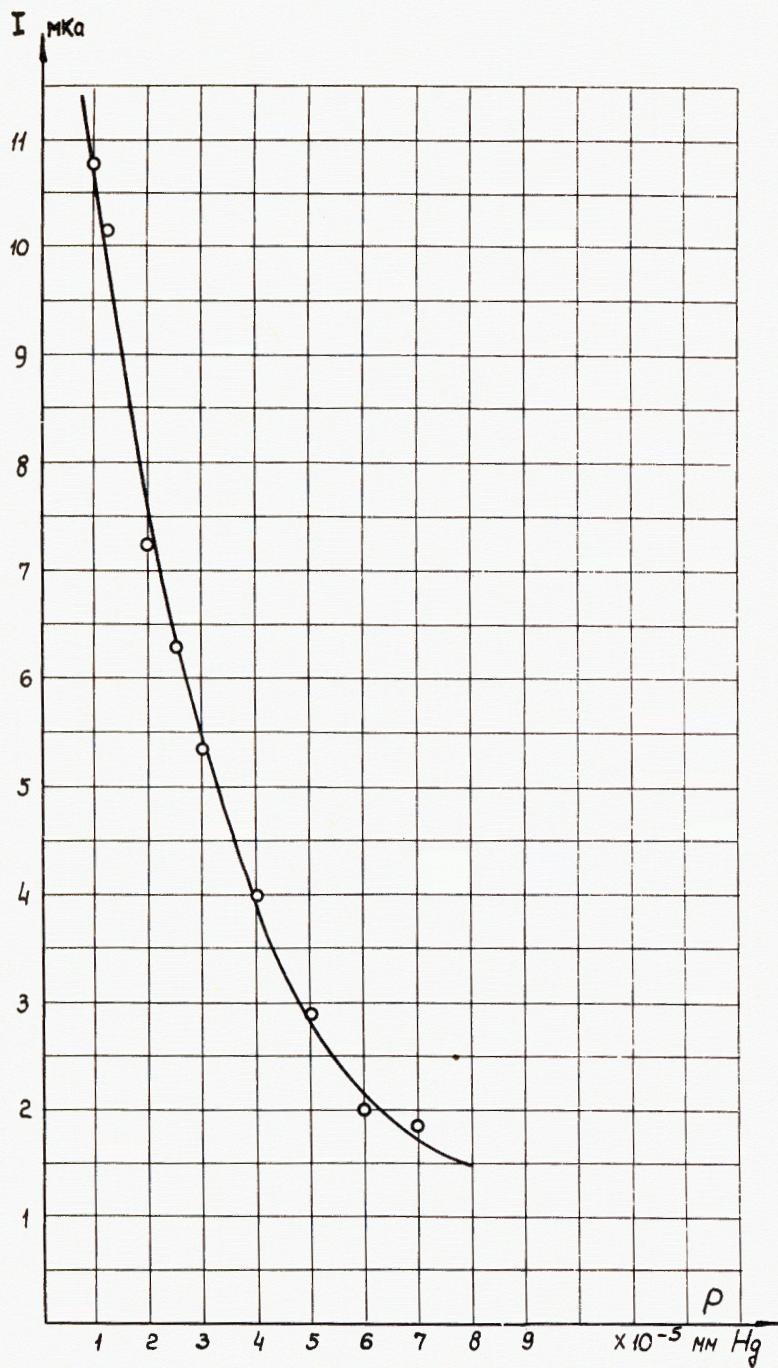
Рис. 2. Кривые спада магнитного поля по радиусу при различных значениях напряженности в центре магнита  $H_u$  и тока радиальной катушки  $J$  (кривые 1, 3, 5 соответствуют одинаковому току намагничивания  $J = 950$  а)

$$\frac{\Delta H_0}{H_0} \%$$

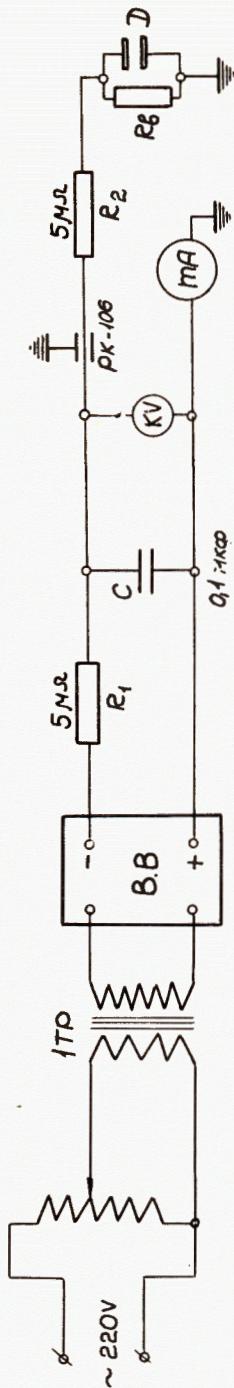
	$H_u$ , кэ	$J$ ради, А
1	16,41	-300
2	16,24	0
3	16,58	0
4	17,20	0
5	16,77	+300







Р и с. 5. Зависимость тока  $C_{12}^{+4}$  от давления в камере циклотрона.



Р р с. 6. Схема электрического питания отклоняющей системы.  
 $R_B$  - сопротивление дросселя водяного охлаждения (50-60 Мом);  
Д - дефлектор.

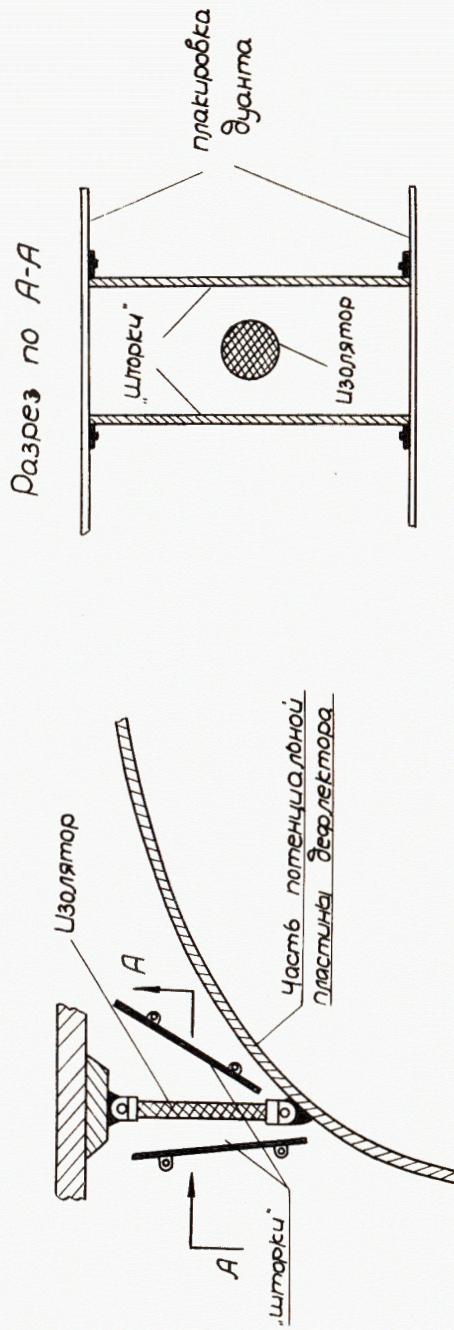
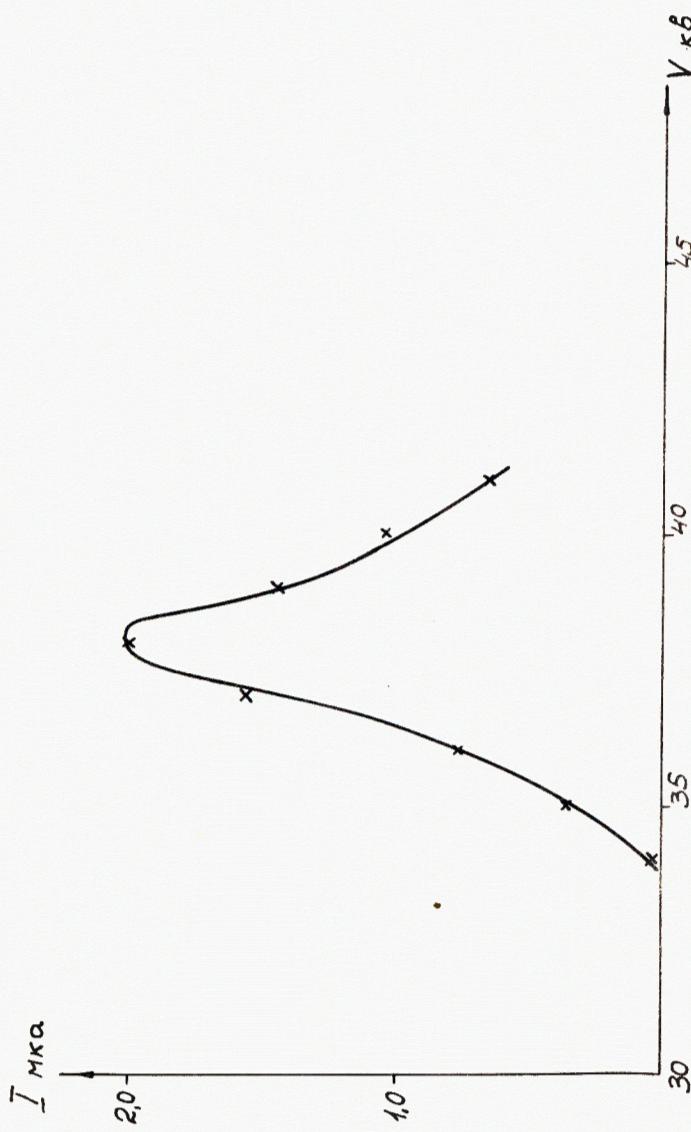
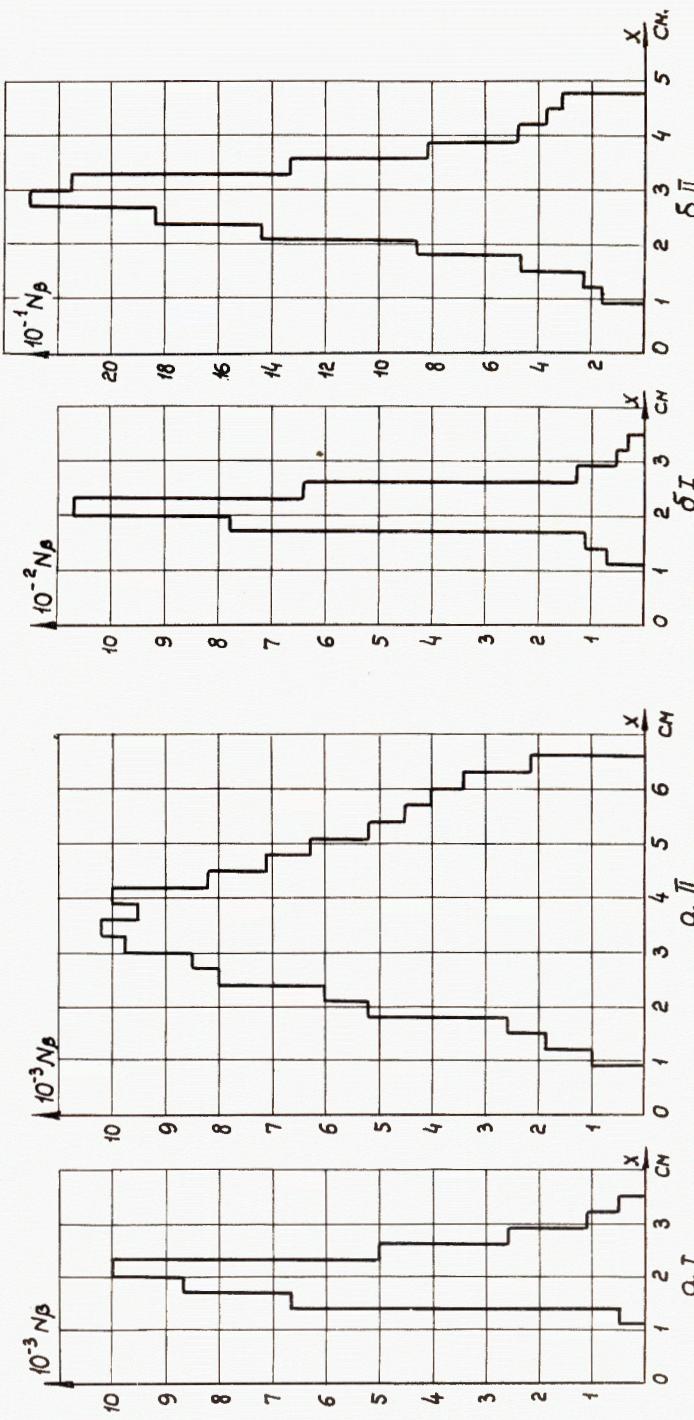


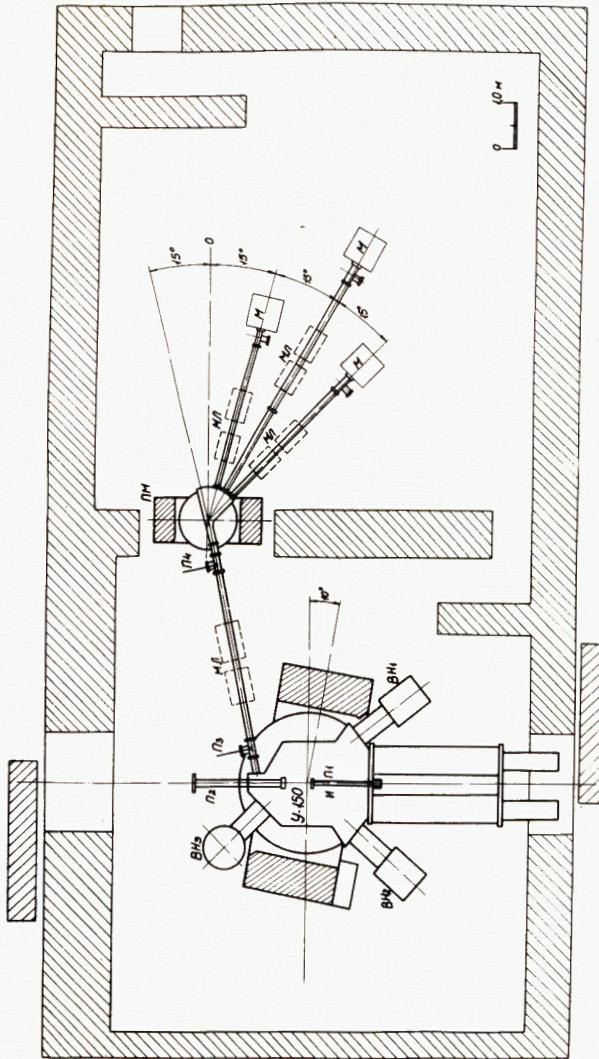
Схема экранирования изоляторов металлическими "шторками".



Р и с. 8. Зависимость тока выведенного пучка  $\text{C}_{12}^{+4}$  от потенциала на дефлекторе.



Р и с. 9. Распределение пучка  $C_{12}^{+4}$  по вертикали I и горизонтали II (метод активации фольг); а) - на оси резонансных плоскостей, б) - в ионопроводе после фокусировки квадрупольными линзами.



Р и с. 10. Схема размещения циклотрона и системы коммутации внешнего пучка.  
П - пробник; ВН - вакуумный насос; МЛ - магнитная линза;  
М - мишень; И - источник; ПМ - поворотный магнит.