

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1858



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

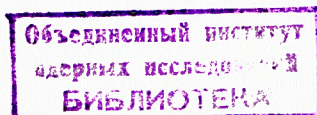
ПЕРЕСТРОЙКА ПОЛУТОРАМЕТРОВОГО
ЦИКЛОТРОНА В РЕЖИМ УСКОРЕНИЯ
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

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

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

ПЕРЕСТРОЙКА ПОЛУТОРАМЕТРОВОГО
ЦИКЛОТРОНА В РЕЖИМ УСКОРЕНИЯ
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Направлено в журнал "Атомная энергия"



В в е д е н и е

Серийный полутораметровый циклотрон У - 150^{1/1} по проекту предназначен для ускорения дейтронов и α -частиц до энергии 12 Мэв/нуклов 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 (Т) на заданном радиусе (R) и длина волны ВЧ-генератора (λ) связаны простым соотношением:

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

где λ - в метрах, R - в см. Таким образом, при конечном радиусе R = 66 см для получения энергии (5-8) Мэв/нуклон необходимо иметь диапазон волн в пределах от 30 до 40 метров^{2/2}. 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 а/см². 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 ÷ 5) см³/мин. Из источника могут быть получены ионы C⁺⁴, N⁺⁵, O⁺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 ($R \sim 67$ см). Для создания аксиальной фокусировки в центральной области установлены внешние дисковые шиммы

$\rho = 30$ см. Плавная регулировка радиального спада осуществляется внешними радиальными катушками. Две пары азимутальных катушек, расположенных под углом 90° , служат для нацеливания пучка на вход отклоняющей системы (рис. 1). Управление током в катушках осуществляется с пульта.

Измерения магнитного поля проводились ядерным магнитометром с выносным датчиком^{/4/}, изготовленным на основе стандартного магнитного измерителя ИМИ-2^{/5/}. 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^{/6/}.

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 перекося крышек вакуумной камеры и смещения секционных внешних кольцевых шимм. После исправления перекося 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 ± 10 мм.

Радиальный заброс ионов на мишень и их вертикальное распределение определялось методом активации фольг. Высота пучка в области конечных радиусов ~ 10 мм. Максимальное расширение пучка на радиусе ~ 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 изменять 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^{/7/} и измерялись на далеких радиусах методом, описанным в работах^{/8/}. 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^{/9/}. Измерения полупроводниковым датчиком согласуются с расчетом энергии по известным значениям R и Π 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 ~ 4000 л/сек, что обеспечило вакуум ~ $1 \cdot 10^{-5}$ 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 ÷ 220) кв
Давление в камере	- $(0,5 \div 1) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.
Частота импульсов ионного источника	- (50 ÷ 150) гц
Длительность импульса	- (0,5 ÷ 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 ~ 50 кв и выше развивались кратковременные пробои, приводящие к сильному запалу - нию 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

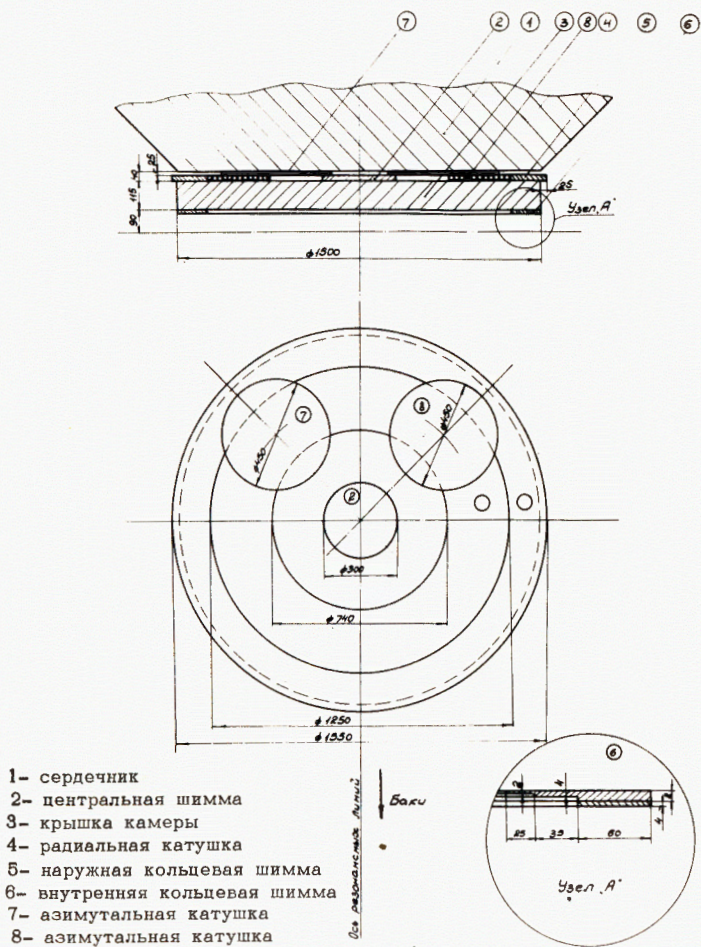
Параметр	C_{12}^{+4}	N_{14}^{+5}
Максимальный внутренний ток, μA	30	20
Максимальный внешний ток, μA	10	7
Поперечный размер пучка, см ²	$\sim 1,5$	$\sim 1,5$

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

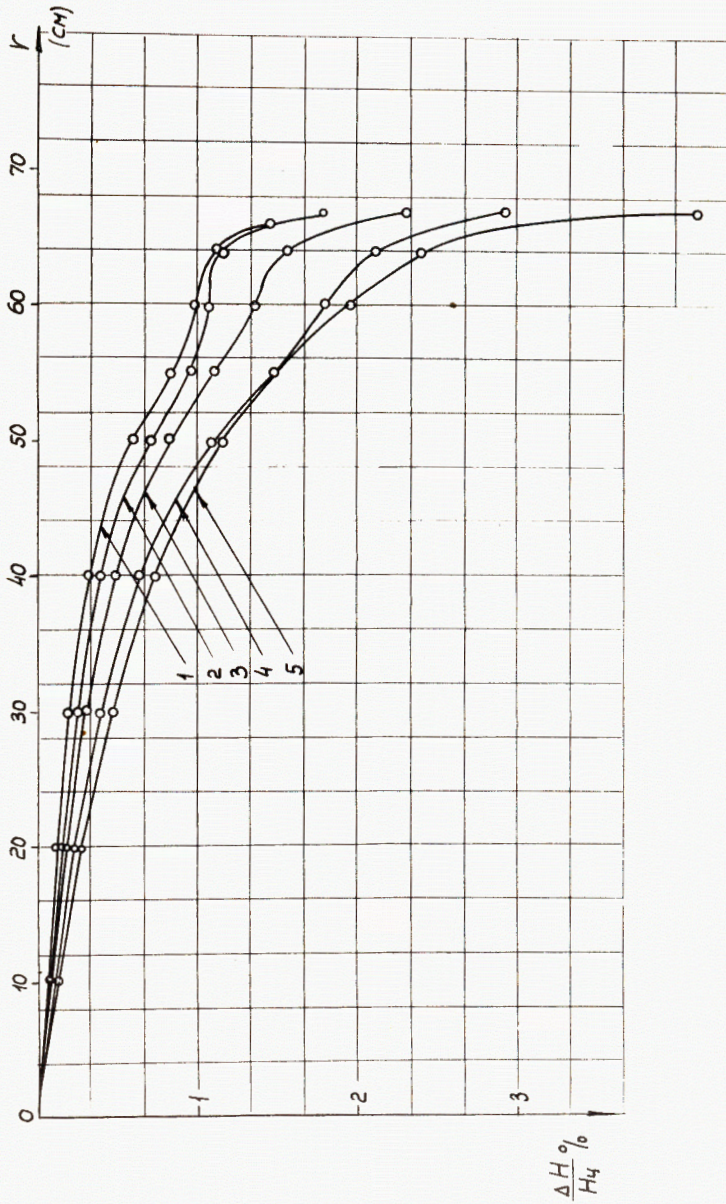
В заключение авторы благодарят члена-корреспондента АН СССР Г.Н. Флерова за постоянный интерес к работе и ряд полезных предложений по ходу ее выполнения, а также В.П. Ковалева, Ф.Т. Коршупова, Пек Ден Ги, В.В. Попова, Л. Села и В. Станку за помощь в проведении экспериментов.

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. Лиев. ПТЭ, № 2, 70 (1957).
7. Г.Н. Вялов. Атомная энергия, т. 16, вып. 5, 442-444 (1964).
8. А.Ф. Лиев. Труды пятой научно-технической конференции по ядерной электронике, ч. 1, том. II. М, Госатомиздат, 1963;
- Ю.Ц. Оганесян, А.П. Кабаченко, А.Ф. Лиев. Препринт ОИЯИ, 1125, Дубна, 1962.
9. Х. Кекк, В.Л. Михеев, А.А. Плева, Б.В. Фефилов. ПТЭ, № 4, 27 (1963).
10. А.С. Пасюк и др. Препринт ОИЯИ, 1522, Дубна, 1964.
11. В.В. Бабииков, Г.Н. Вялов, Г. Индреаш. Препринт ОИЯИ, 1480, Дубна, 1963.

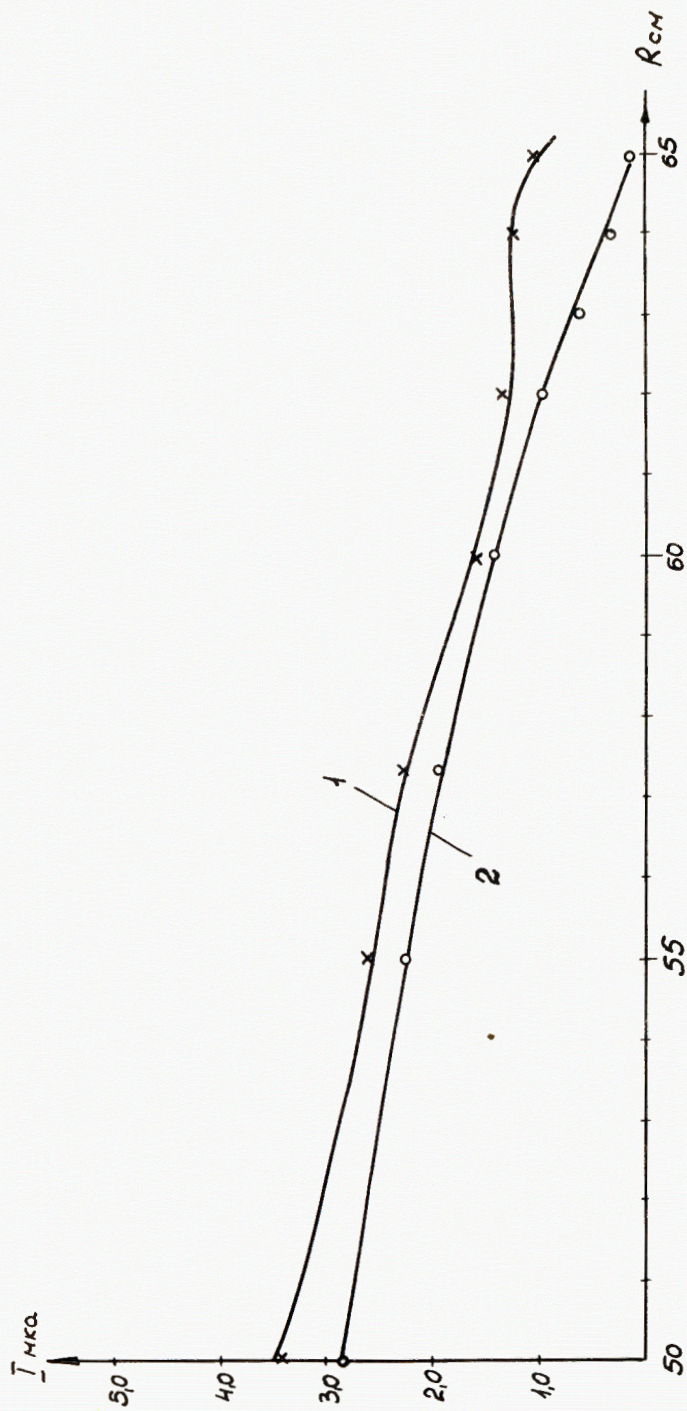


Р и с. 1. Схема шиммирования магнита.

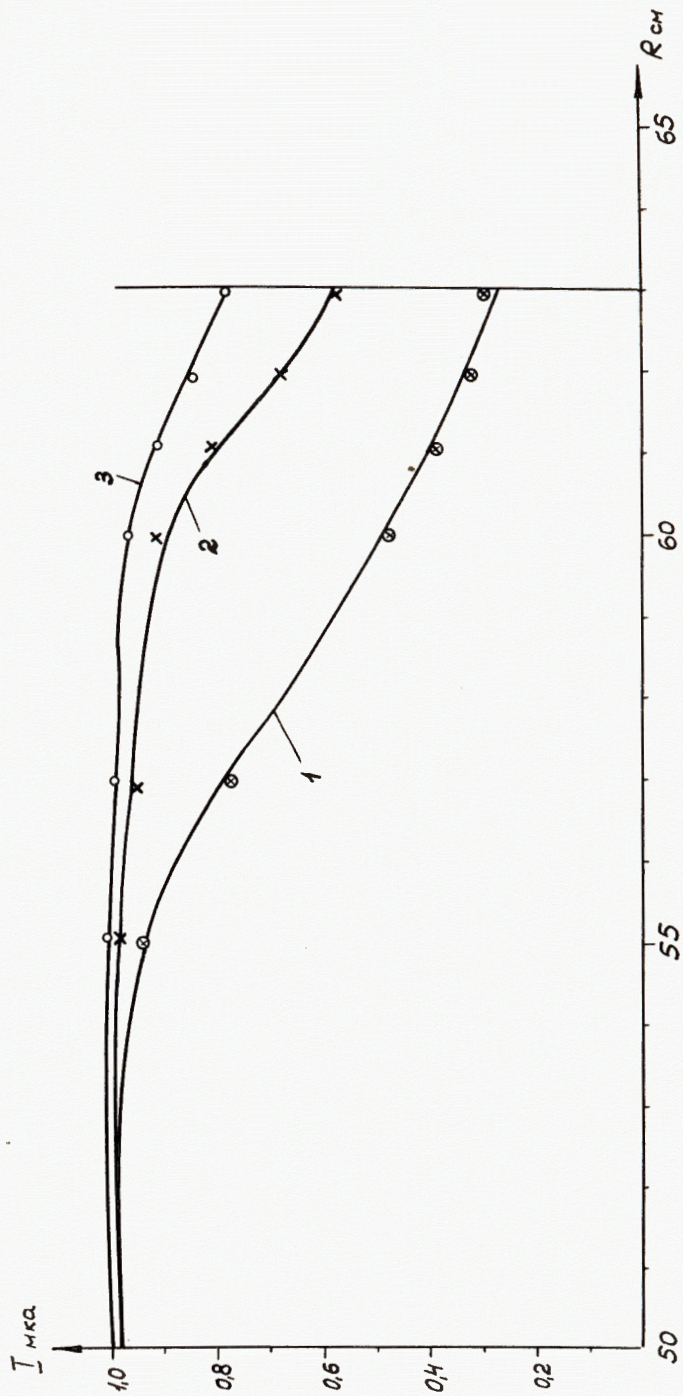


Р и с. 2. Кривые спада магнитного поля по радиусу при различных значениях напряженности в центре магнита H_4 и тока радиальной катушки J рад (кривые 1, 3, 5 соответствуют одинаковому току намагничивания $J = 950$ а)

	H_4 , кэ	J рад, А
1	16,41	-300
2	16,24	0
3	16,58	0
4	17,20	0
5	16,77	+300

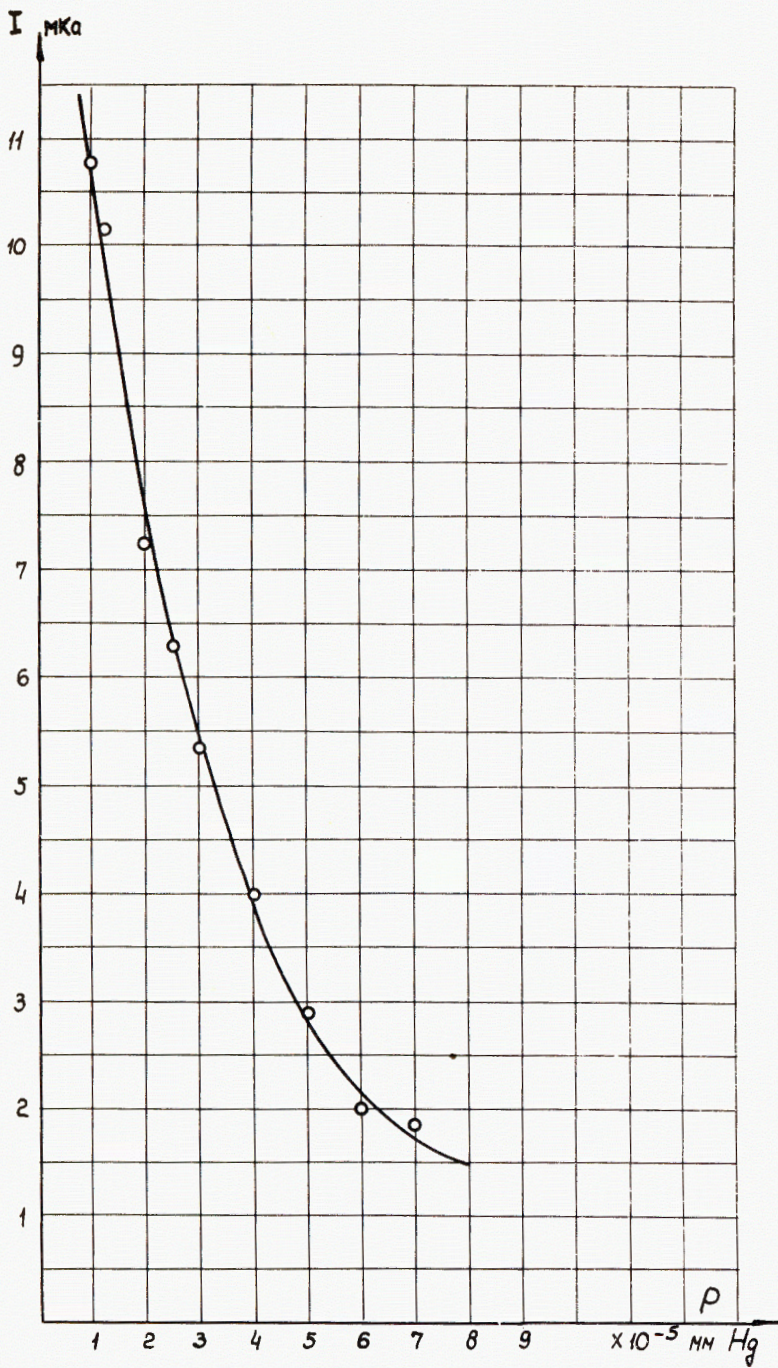


Р и с. 3. Зависимость тока S^{+4} от радиуса для двух значений магнитного поля в центре при $2V_0 = 195$ кв.
 Кривая 1 - $H_{II} = 16,7$ кэв;
 - - - - - 2 - $H_{II} = 17$ кэв.

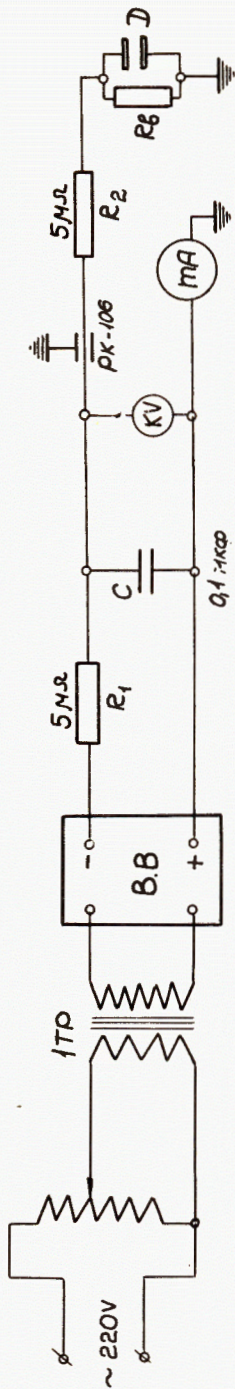


Р и с. 4. Зависимость тока N^{+5} от радиуса при включении радиальной катушки (настройка на радиусе 14 R = 63 см).

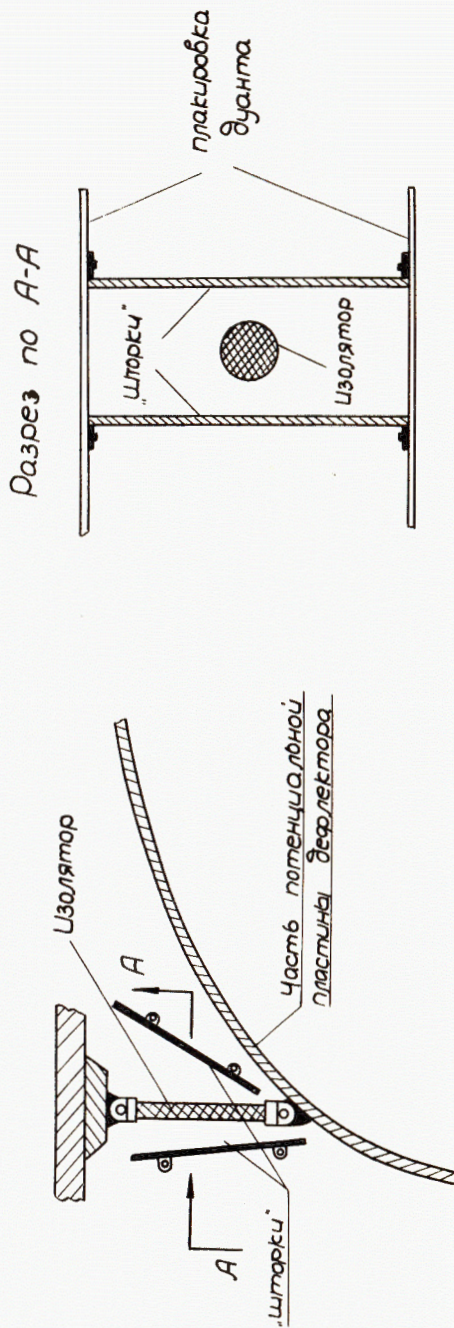
Кривая 1	-	J рад = - 170 а;
" 2	-	J рад = 0 ;
" 3	-	J рад = + 150 а,
		рад



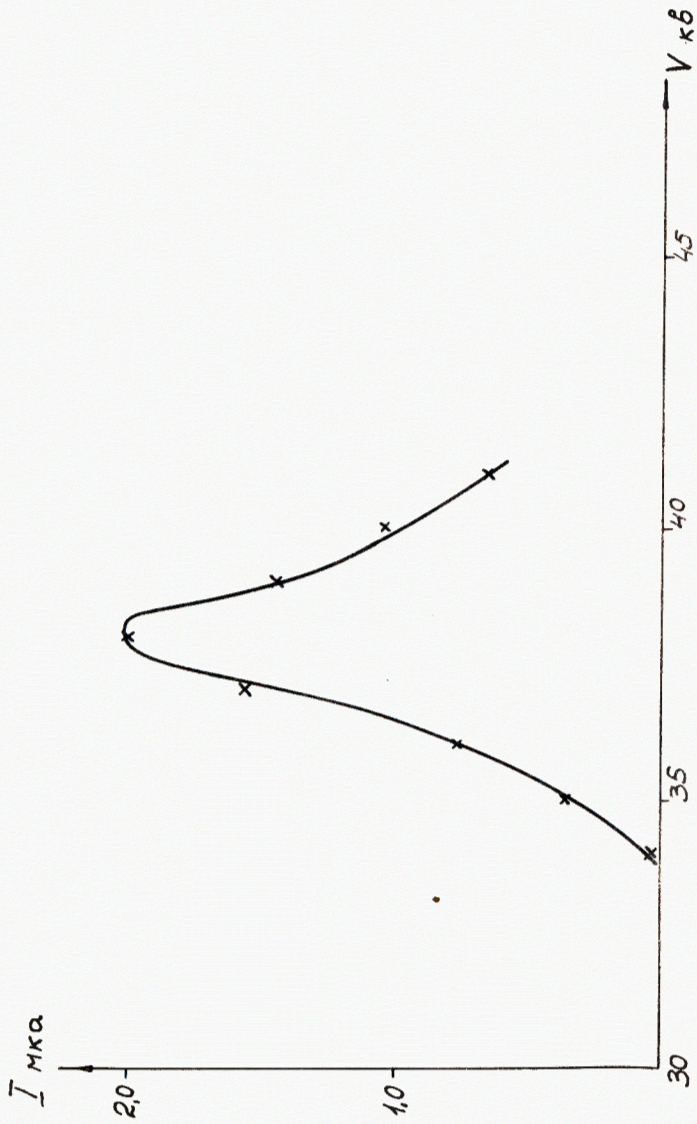
Р и с. 5. Зависимость тока C_{12}^{+4} от давления в камере циклотрона.



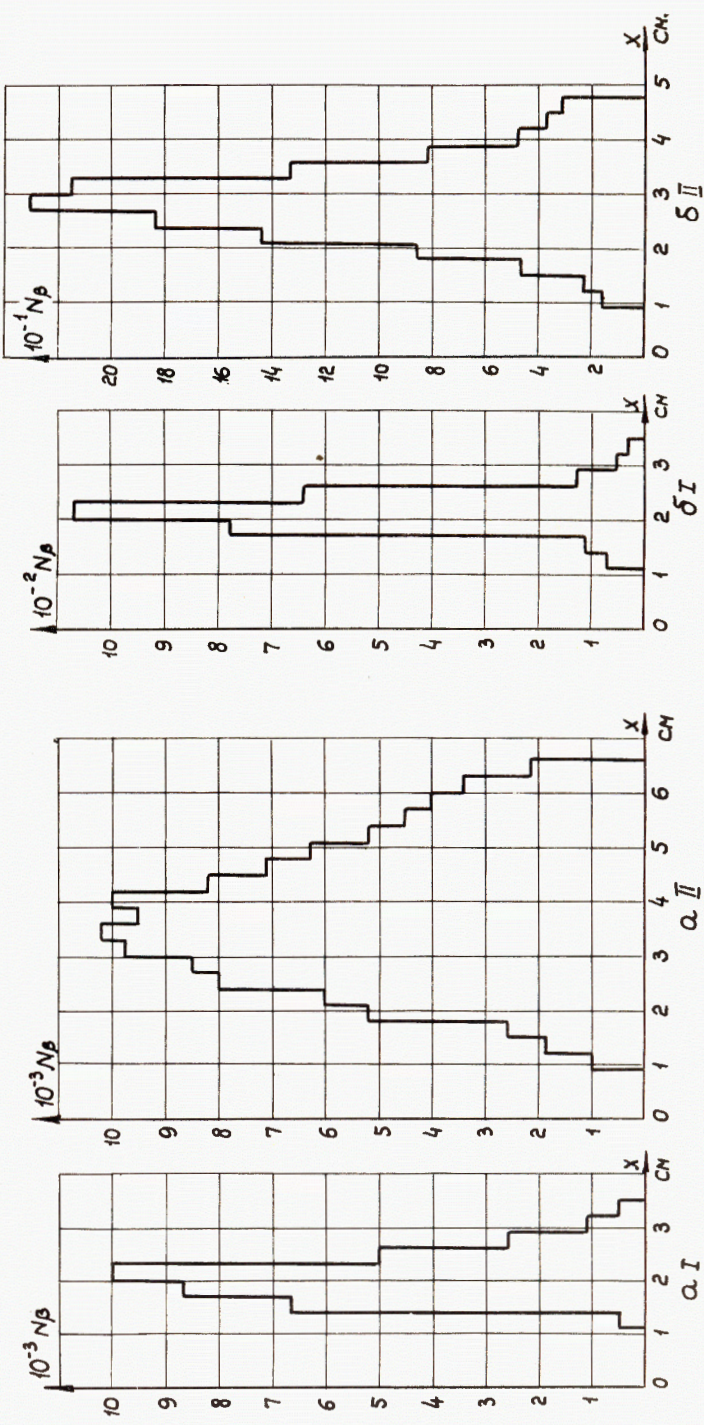
Р и с. 6. Схема электрического питания отклоняющей системы.
 R_B - сопротивление дросселя водяного охлаждения (50-60 Ом);
 Д - дефлектор.



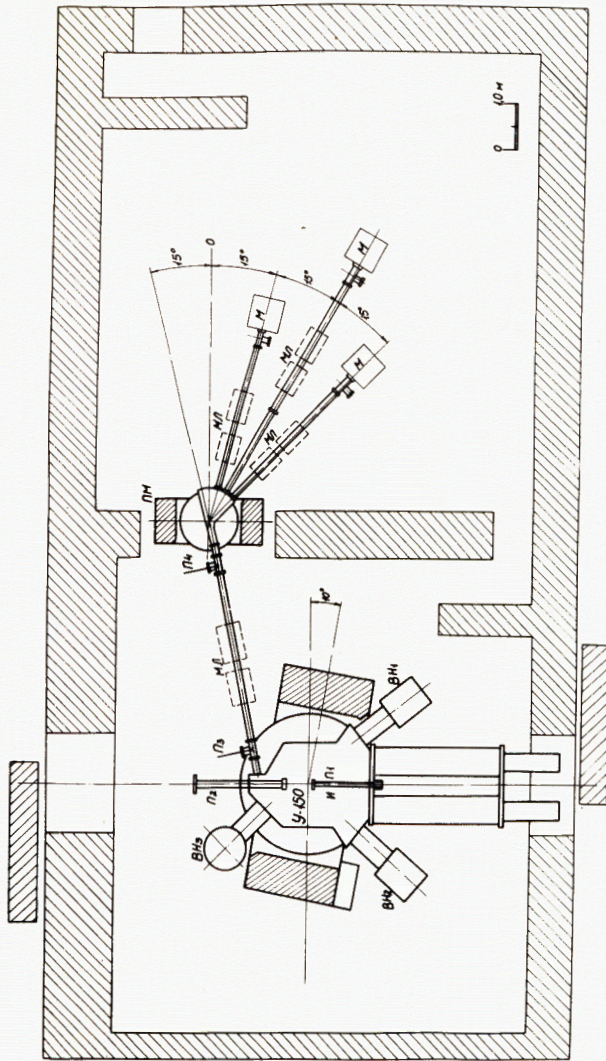
Р и с. 7. Схема экранирования изоляторов металлическими "шторками".



Р и с. 8. Зависимость тока выведенного пучка C_{12}^{+4} от потенциала на дефлекторе.



Р и с. 9. Распределение лучка S_{12}^{+4} по вертикали I и горизонтали II (метод активации фольг): а) - на оси резонансных линий; 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.