

0345и

Г-524

3/III-65

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P-2199



А.А. Глазов, А.А. Кропин, Д.Л. Новиков, Л.М. Онищенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ
В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ЦИКЛОТРОНА
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ
НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1965

P-2189

3391/2 ч. 4

А.А. Глазов, А.А. Кропик, Д.Л. Новиков, Л.М. Огищенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ
В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ЦИКЛОТРОНА
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ
НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Циклотрон с пространственной вариацией напряженности магнитного поля Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ^{/1/} является ускорителем со спирально-гребневым магнитным полем и для целого ряда экспериментов может служить моделью релятивистского протонного циклотрона на энергию 700 Мэв^{/2/}. На нем, в частности, с достаточной степенью подобия можно осуществить экспериментальную проверку достоверности предпосылок, положенных в основу расчета траекторий ионов в центральной области релятивистского циклотрона^{/3/}, на основании которых должна быть осуществлена геометрия центральной области ускорителя.

Геометрический коэффициент подобия определяется из выражения

$$\eta = \frac{e/m_0 \ell^2 B^2}{U},$$

где e/m_0 - отношение заряда к массе, ℓ - расстояние между ионным источником и пулером, B - индукция магнитного поля в центре, U - напряжение дуанта. При ускоряющем напряжении на дуанте модели релятивистского циклотрона (МРЦ) равном 40 кв и расстоянии между ионным источником и пулером $\ell = 10$ мм подобие по геометрии системы отбора составляет 1:2.

Расчет траекторий ионов (D^+ и N_2^+) в МРЦ проведен по той же методике, что и в работе^{/3/} для оптимального положения ионного источника (рис. 1). Экспериментально измеренный спад магнитного поля^{/4/} показан на рис. 2. Для расчета траекторий ионов этот спад аппроксимировался кривой

$$B_z = B_0 \left[1 - 3,33 \cdot 10^{-2} \exp \left(- \frac{5,232}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \right],$$

(точки на графике рис. 2).

Экспериментальное исследование включало в себя выяснение соответствия экспериментальных данных с расчетными и сравнение результатов, полученных при наличии центральной системы отбора и без нее.

Основными критериями оптимальности настройки были: величина спада тока на начальных радиусах ускорения, совпадение центров орбит с центром ускорителя, положение центра сгустка ускоряемых ионов относительно максимума высокочастотного напряжения. Результаты экспериментов приводятся ниже.

1. Положение ионного источника

Конструкция и схема питания ионного источника ускорителя показаны на рис. 3. Катоды и анодная трубка выполнены из тантала. Режим источника таков, что ионной бомбардировки недостаточно для разогрева катодов до температуры, соответствующей термоэмиссии. В связи с этим напряжение на источнике весьма велико (~ 2 кв), ток разряда мал ~ 10 ма, и для стабильной работы требуется подача большого количества рабочего газа (водород при работе на H_2^+ или дейтерий).

Следует отметить, что маломощность источника являлась одним из недостатков при проведении экспериментов, так как ток ускоренных частиц очень сильно зависел от его режима. Большие подачи газа вызывали увеличение давления в камере ускорителя до $2,7-3,8 \cdot 10^{-3}$ н/м² (против $6,7 \cdot 10^{-4}$ н/м² без газа), что, безусловно, увеличивало потери, связанные с кулоновским рассеянием, и диссоциацию молекулярного водорода.

Конструкция системы, несущей ИИ, такова, что допускает перемещение его вдоль кромки дуанта и перпендикулярно к ней без нарушения вакуума. При этом процедура определения оптимального положения ИИ заключалась в измерении спадов тока вдоль радиуса и определения положения центров для различных положений ИИ.

В таблице 1 приведены экспериментально полученные оптимальные координаты эмитирующей кромки ИИ и расчетные координаты для системы отбора.

Таблица 1

Услов. экпер.	без пулера	с пулером	с пулером (расчет)
X_0	-20 мм	0- -1,5 мм	-2,5 мм
Y_0	-15 мм	-22 мм	-22 мм

На рис. 4 показана зависимость тока на мишень, установленную на радиуса 15 см от положения ИИ (расстояние от кромки дуанта - оптимальное).

2. Спад тока в зависимости от радиуса

Ускоритель снабжен четырьмя пробниками, идущими в горизонтальной плоскости под углами 15, 55, 90, 120° к кромке дуанта. Токоизмерительные насадки (мишени) 2-х пробников можно заменять без нарушения вакуума. Для измерения тока на мишень используются гальванометры М-85 с наружным шунтом.

Результаты измерений спадов приводятся на рис. 5. Для того, чтобы можно было проводить сравнение, спады даны в относительных единицах. Абсолютные значения токов на радиус 5 см 60-120 мха.

Танталовая токоизмерительная мишень имела размеры: высота 20 мм, $\Delta R = 15$ мм. Сравнение зависимости спада тока от радиуса при ускорении ионов D^+ и H_2^+ показывает, что при использовании системы отбора спад тока ионов H_2^+ с радиуса $R = 15$ см до $R = 40$ см обусловлен диссоциацией молекулярного водорода на остаточном газе. Для примера на рис. 6 приведены кривые, характеризующие работу источника и спад тока вдоль радиуса при различных расходах газа. То же самое сравнение при ускорении без центральной системы отбора показывает, что "дейтериевое плато" начинается несколько позже, а именно с радиусов $R = 20-22$ см. Если считать часть тока, вошедшего в процесс изохронного ускорения, по дейтериевому плато и отнести его к току, наблюдаемому на радиусе $R = 8$ см, то в зависимости от настройки магнитного поля ток уменьшается с системой отбора 1,5-2 раза и без нее в 3-8 раз.

3. Положение центров орбит

Положение центров определялось методом трех пробников по 50% перекрытию тока. Результаты измерений приведены на рис. 7. Из рис. 7 видно, что при наличии оптики первого оборота центры орбит практически совпадают с центром ускорителя.

4. Разделение орбит

Для исследования пространственного разделения орбит спад тока по радиусу снимался с помощью экранированной мишени, выступающей из экрана на 2 мм. Результаты измерений приведены на рис. 8. Там же показано расчетное положение орбит. Четкое разделение орбит наблюдается только при хорошем вакууме (и относительно малом токе). Отсутствие спада тока с увеличением радиуса связано с тем, что шаг орбит уменьшается, и на короткую мишень начинает попадать полный ток, а на его часть, как на внутренних радиусах.

5. Перекрытие первого оборота

Определенный интерес представляет исследование ширины пучка на первом обороте и убыли ионов от первого оборота ко второму, т.е. за два прохождения ускоряющей щели. Этому вопросу был посвящен специальный эксперимент. Его результаты показаны на рис. 8. Длина внутренней шторки, укрепленной на ИИ (см. рис. 1), подби-

ралась экспериментально. В том случае, когда в пулере нет дополнительной колонны, ионы, претерпевшие рассеяние на газе в районе первого ускорения наружу от орбиты, ничем не задерживаются. Это приводит к уширению орбиты на первом обороте и убыли пучка ко второму, так как большинство рассеянных частиц приобретают не только горизонтальную, но и вертикальную составляющую скорости.

При установке колонны орбита сужается и убыль пучка от первого ко второму обороту практически отсутствует.

6. Исследование вертикального распределения частиц в ускоренном пучке

Для исследования вертикального распределения использовалась различная методика и различные мишени в зависимости от радиуса, на котором происходит измерение. Интегральный метод заключался в постепенном перекрытии высоты мишени экраном и измерении спада тока. Вертикальное распределение определялось при этом дифференцированием полученной кривой. При дифференциальном методе сквозь пучок по вертикали проводилась тонкая (диаметром 1-3 мм) мишень с экранированным основанием. Недостатком измерений как тем, так и другим методом было то, что перемещение экрана или тонкой мишени по вертикали осуществлялось вращением пробника вдоль оси, что приводило к некоторому изменению радиуса в процессе измерения. Для уменьшения связанных с этим ошибок приходилось использовать дифференциальные мишени разной длины при измерении на различных радиусах (длиннее на малых радиусах, где большое разделение орбит). Результаты измерений приведены на рис. 10. Из рис. 10 следует, что высота пучка, измеренная на уровне 0,5 составляет примерно 5-6 мм при наличии пулера и 10-12 мм без него. На всех радиусах пучок идет выше геометрической средней плоскости ускорителя.

7. Исследование формы сгустка ускоряемых ионов

Форма сгустка ускоряемых ионов наблюдалась с помощью скоростного осциллографа. Пробник, идущий по углам 90° к кромке дуанта, был выполнен в виде 150-омной коаксиальной линии, заканчивающейся вакуумно-плотным 150-омным разъемом. Сигнал по согласованному 150-омному кабелю подавался на вход широкополосного усилителя, с выхода которого поступал на согласованный вход осциллографа.

Полоса пропускания тракта сигнала составляла 200 Мгп. Синхронизация осциллографа осуществлялась с помощью специальной схемы, которая понижала частоту с 10 Мгп (частота генератора циклотрона, равная частоте следования сгустков) до частоты < 20 кгц, являющейся верхней частотой запуска осциллографа.

Сигнал на схему синхронизации поступал со специального емкостного делителя, связанного с дуантом ускорителя. Форма импульсов на различных радиусах показана на рис. 11.

Фаза напряжения, наводимого на мишень, благодаря наличию емкостной связи с дуантом, примерно на 90° опережает фазу напряжения на дуанте. Разность фаз может несколько уменьшаться только при измерении на очень маленьких радиусах. Угол пролета частиц от дуанта до пробника составляет 90° . Таким образом фаза сгустка на мишени на 180° отличается от фазы сгустка по отношению к ускоряющему напряжению в момент вылета из дуанта.

Из рис. 11 видно, что при наличии пулера сгусток является хорошо сформированным. Он занимает правильное положение по отношению к фазе ускоряющего напряжения. Его длительность при основании составляет примерно 0,1 от периода высокочастотного ускоряющего напряжения.

Без пулера импульс значительно хуже, он имеет сложную структуру.

З а к л ю ч е н и е

В результате анализа полученных результатов можно сделать вывод, что экспериментально подобранная геометрия центральной области с достаточно высокой степенью точности совпала с теоретически рассчитанной. При этом по сравнению с системой без центральной оптики

- а) уменьшился спад тока на первых оборотах,
- б) улучшилась группировка центров орбит вблизи геометрического центра ускорителя,
- в) уменьшились вертикальные размеры пучка на малых радиусах,
- г) значительно улучшилась форма импульса тока ускоряемых частиц.

Таким образом, результаты, полученные в работе ^{13/}, могут служить достаточным основанием для проектирования центральной оптики релятивистского протонного циклотрона на энергию 700 Мэв.

В заключение авторы благодарят Е.Схвабе за участие в обсуждении программы и методики исследований, М.Семенова за разработку аппаратуры, М.Ананьева и П.Рыбакова за обеспечение экспериментов на ускорителе и Т.Кочкину за расчет траекторий ионов на ЭСМ.

Л и т е р а т у р а

1. Д.П.Василевская, А.А.Глазов, В.И.Данилов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолотчиков, Н.Л.Заплатия, В.В.Кольга, А.А.Кропня, Лю Нэ-чуань, В.С.Рыбалко, А.Л.Савенков, Л.А.Саркисян, Атомная энергия, том 8, 189 (1980).
2. М.А.Гашев, А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолотчиков, Н.Л.Заплатия, В.В.Кольга, М.М.Комочков, А.А.Кропня, И.Ф.Малышев, Н.А.Моносзон, А.В.Попкович. Труды международной конференции по ускорителям, Дубна, 21-27 августа 1983 г., стр. 547, Атомиздат, 1984.
3. А.А.Глазов, Д.Л.Новиков, Л.М.Онищенко, Т.П.Кочкина. Препринт ОИЯИ 1841, Дубна, 1984.
4. С.Б.Ворожцов, Джо Вей-дзян, Н.Л.Заплатия, А.А.Кропня, В.С.Рыбалко, А.А.Саркисян, Е.Схвабе. Препринт ОИЯИ Р-2185, Дубна, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 июня 1985 г.

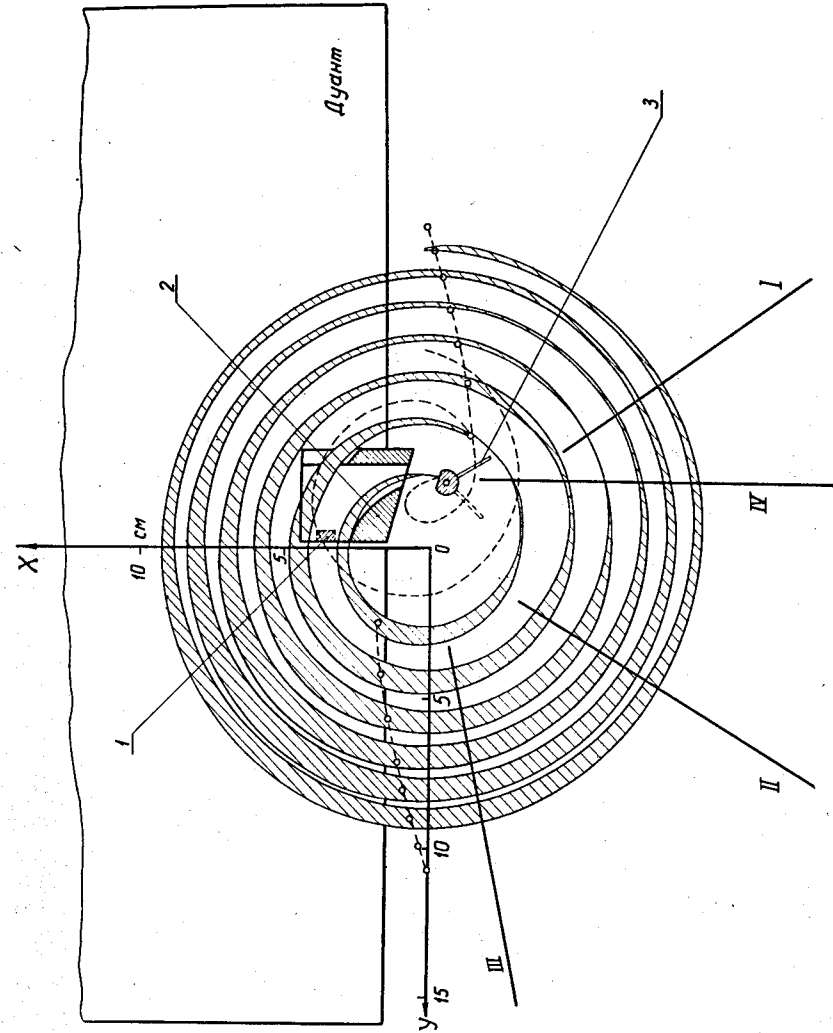


Рис. 1. Траектории ионов D^+ в центральной области модели релятивистского циклотрона. Точками обозначено движение иона с фазой $\alpha = 0^\circ$ через каждые 180° . 1 - дополнительная колонна, 2 - пулер, 3 - внутренняя шторка.

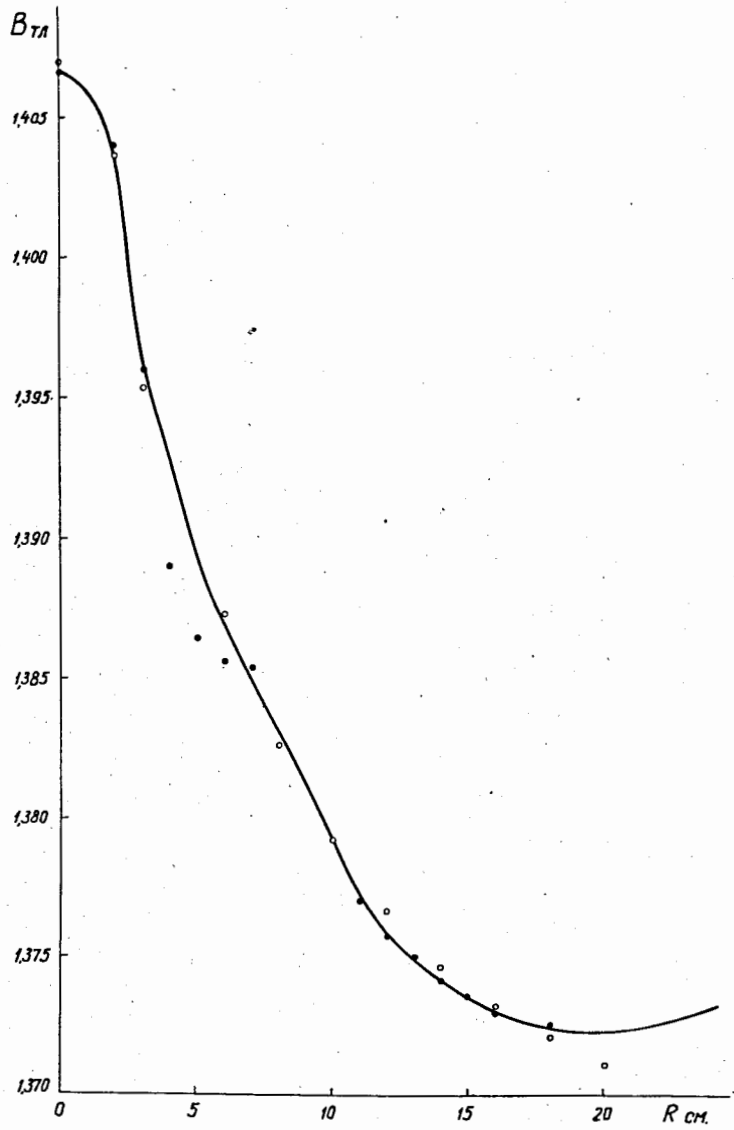


Рис. 2. Спад магнитного поля в центральной области МРЦ

● экспериментальные точки,
○ расчетные точки.

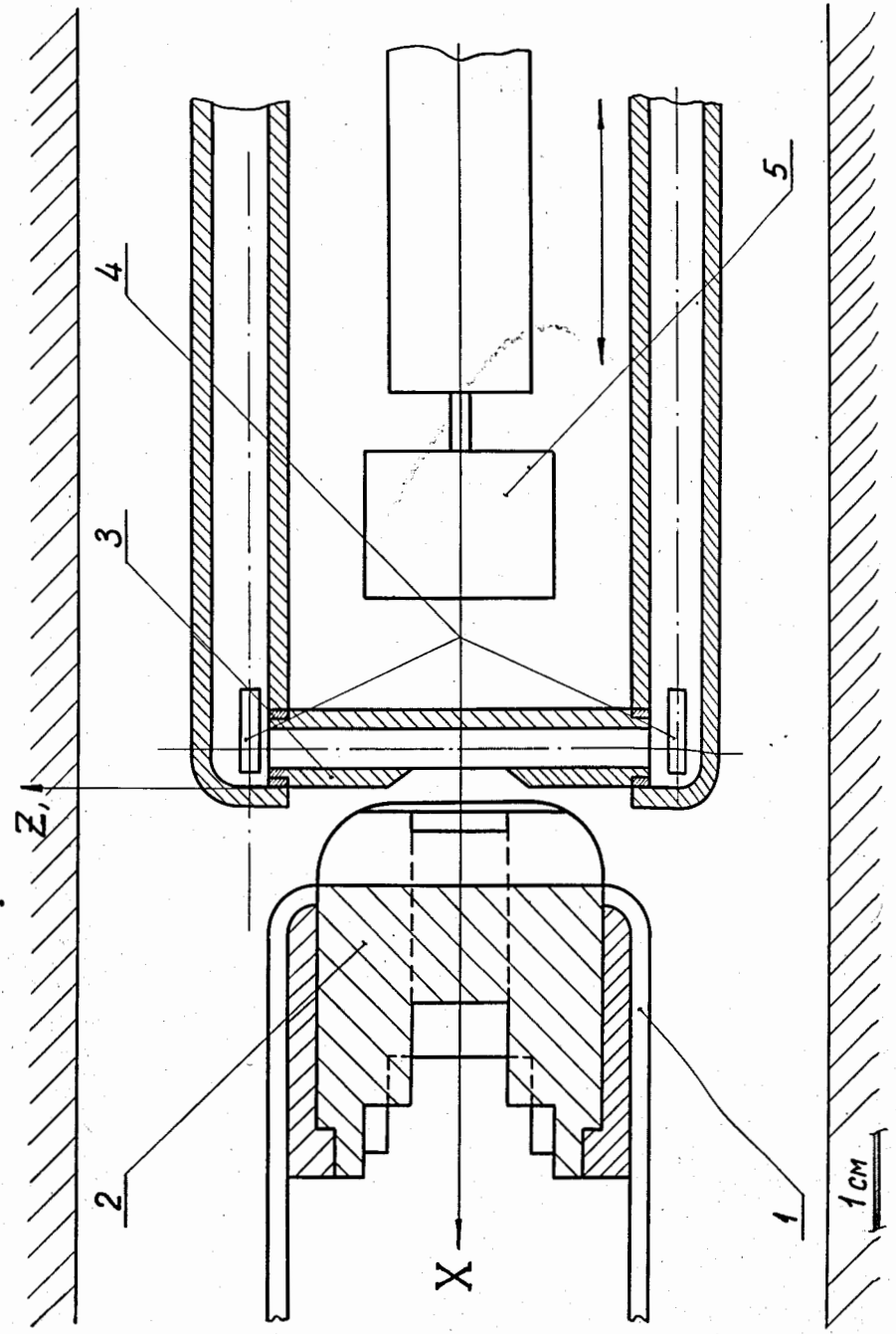


Рис. 3. Конструкция и схема питания лонного источника. 1 - дуант, 2 - пружа, 3 - яд лонного источника, 4 - катушка лонного источника, 5 - катушка источника № 4.

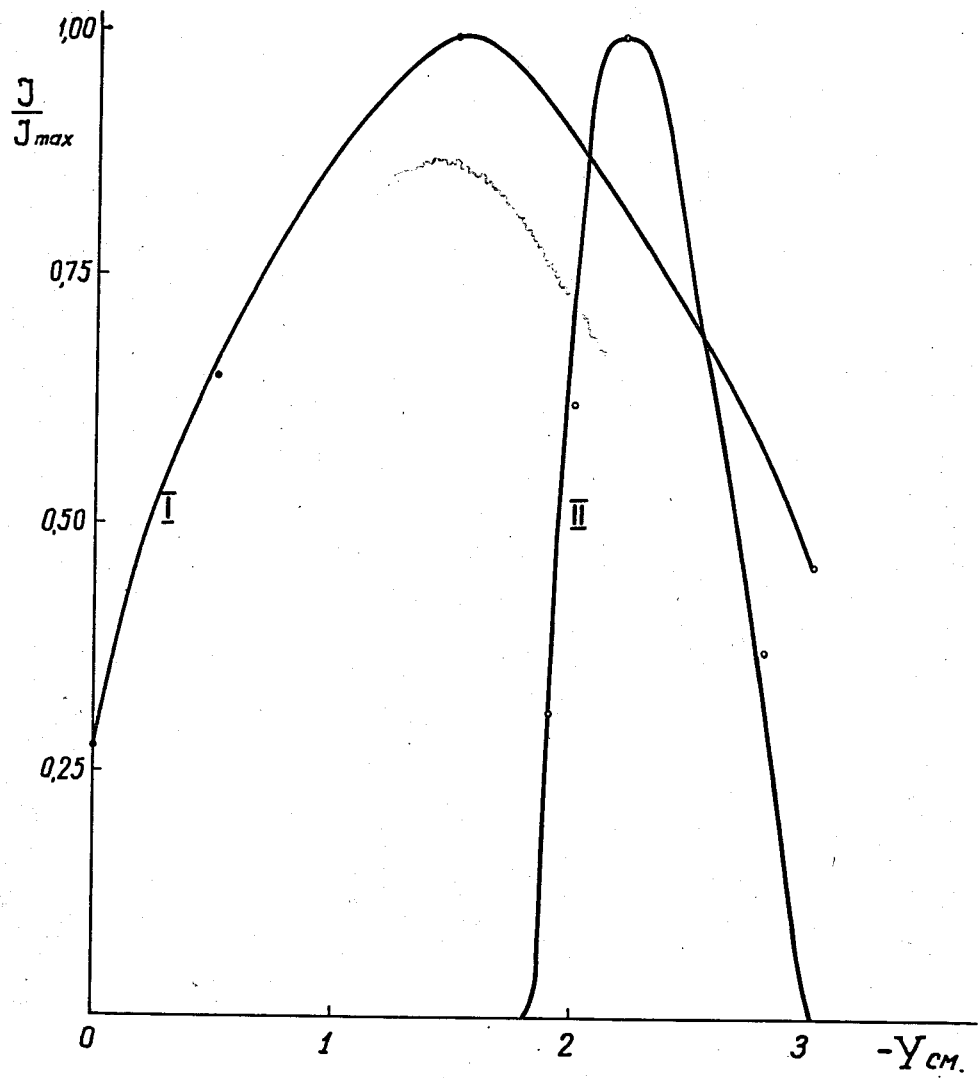


Рис. 4. Зависимость тока на мишень от положения ионного источника.
 I - зависимость без системы отбора, II - зависимость с системой отбора.

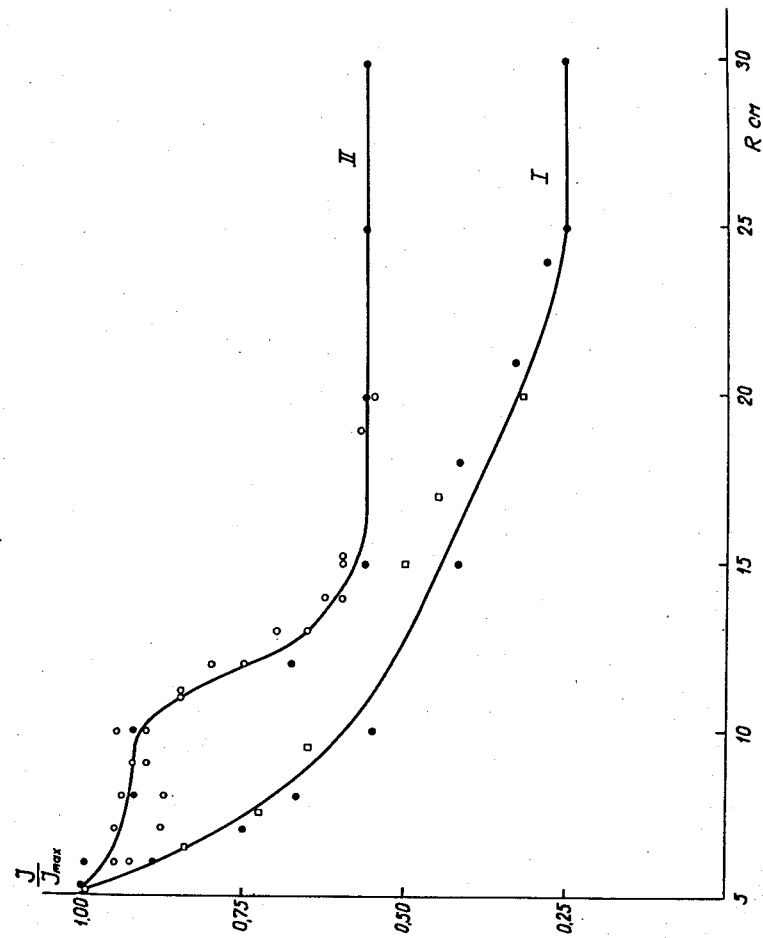


Рис. 5. Спад тока по радиусу. I - зависимость без системы отбора, II - зависимость с системой отбора, ● - ⊕ - случай ускорения ионов D^+ , ○ □ - ускорения ионов H^+ .

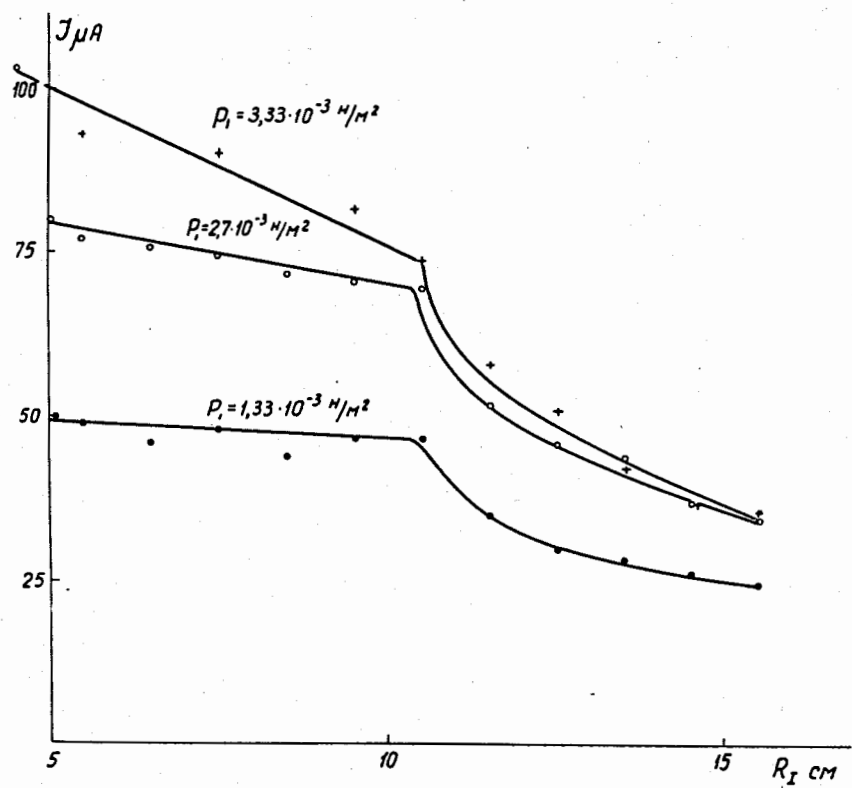


Рис. 6. Зависимость тока по радиусу при различных расходах газа.

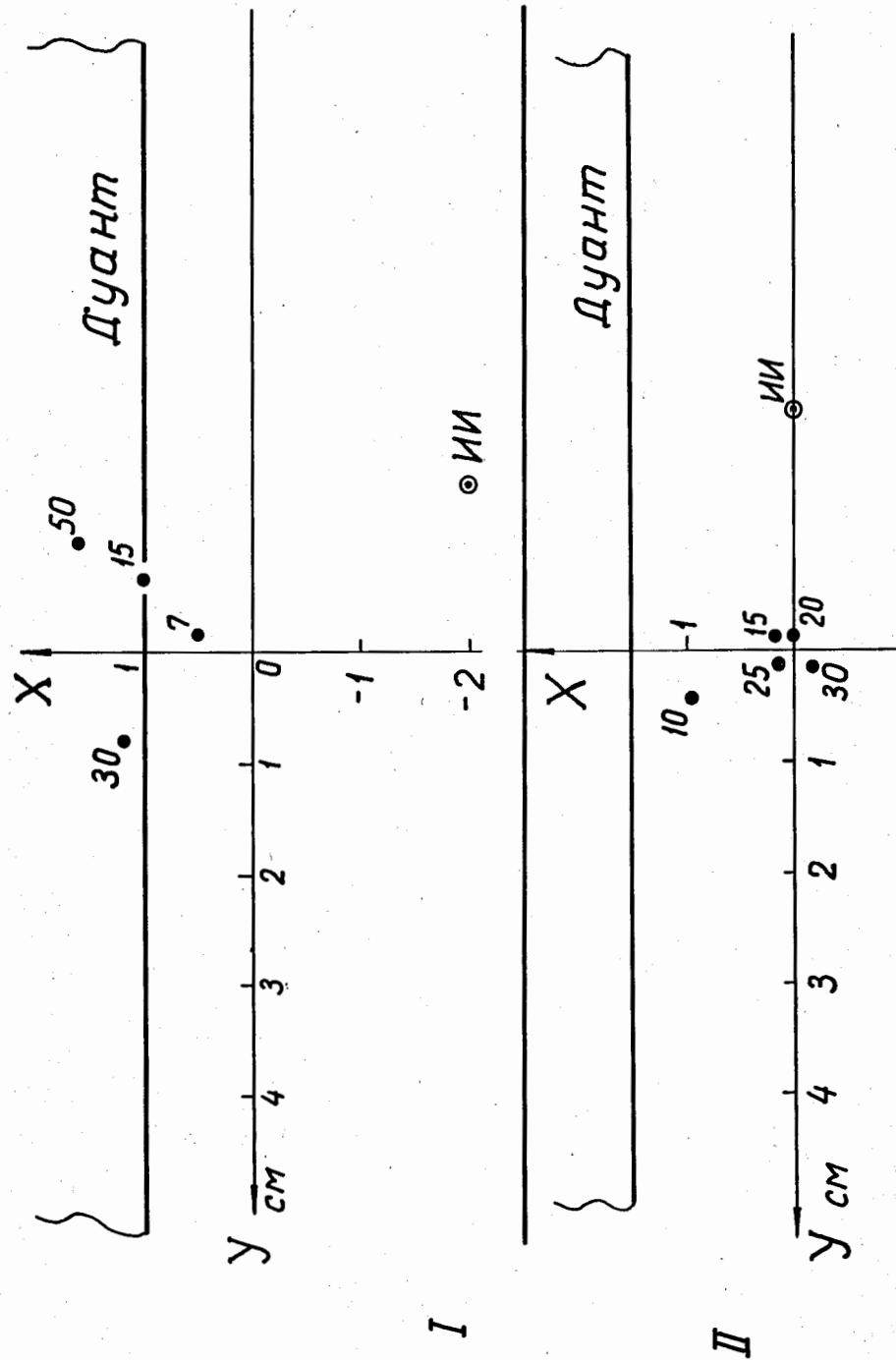


Рис. 7. Положение центров орбит. I - положение без системы отбора, II - положение с системой отбора.

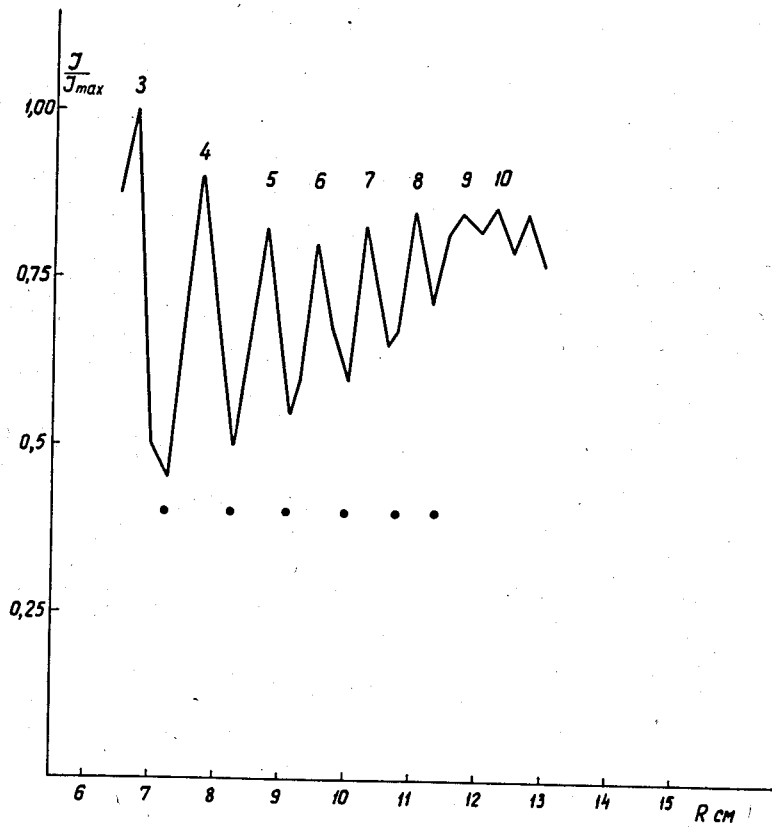


Рис. 8. Пространственное разделение орбит. Точками обозначены расчетные значения положения минимумов.

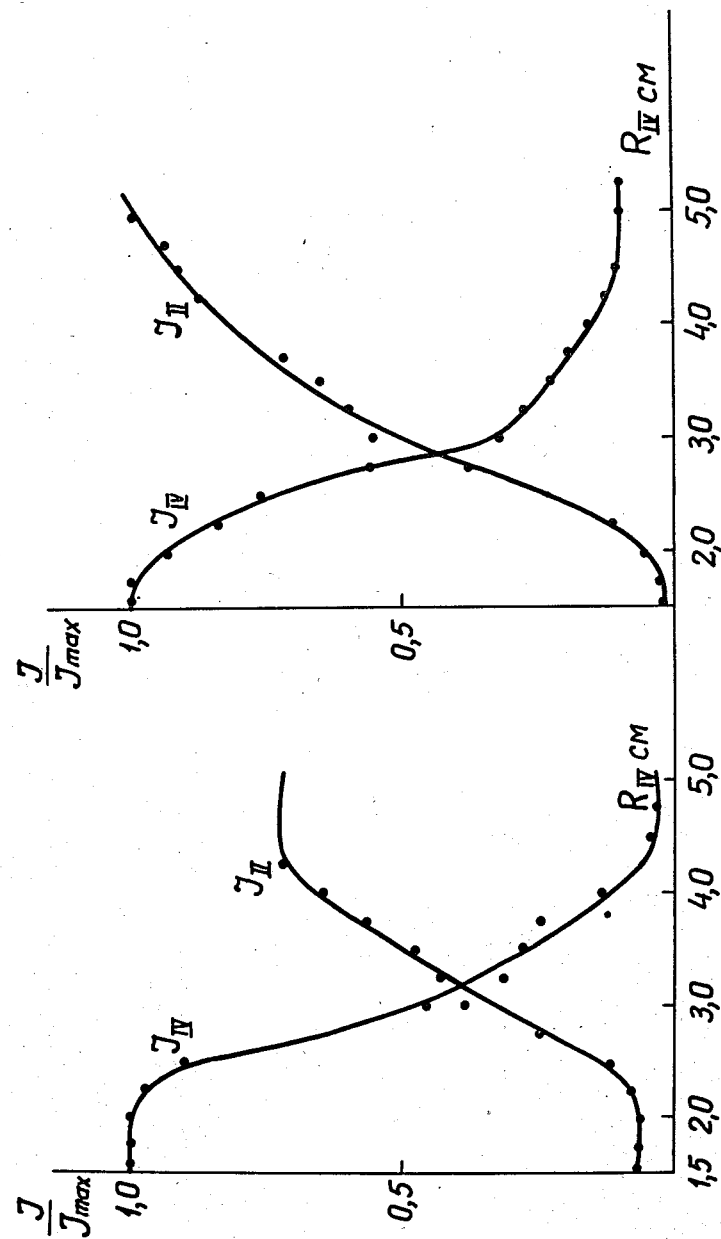


Рис. 9. Радиальное перекрытие конов на первом обороте.

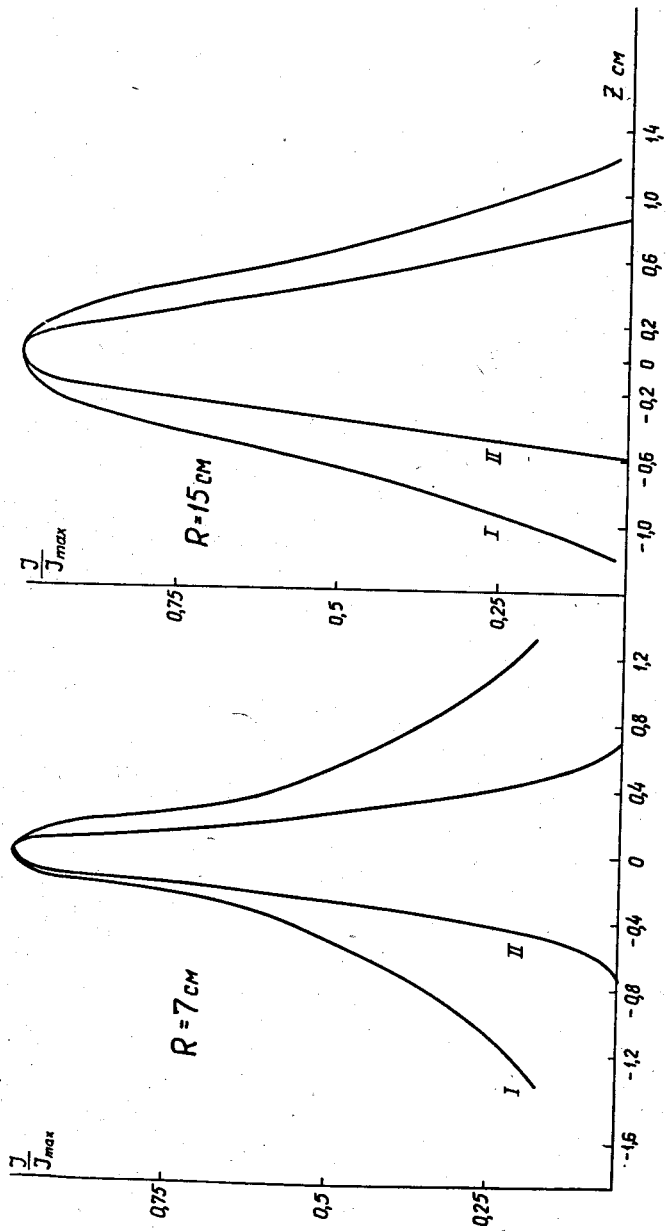


Рис. 10. Вертикальное распределение ионов. I - распределение без системы отбора, II - распределение с системой отбора.

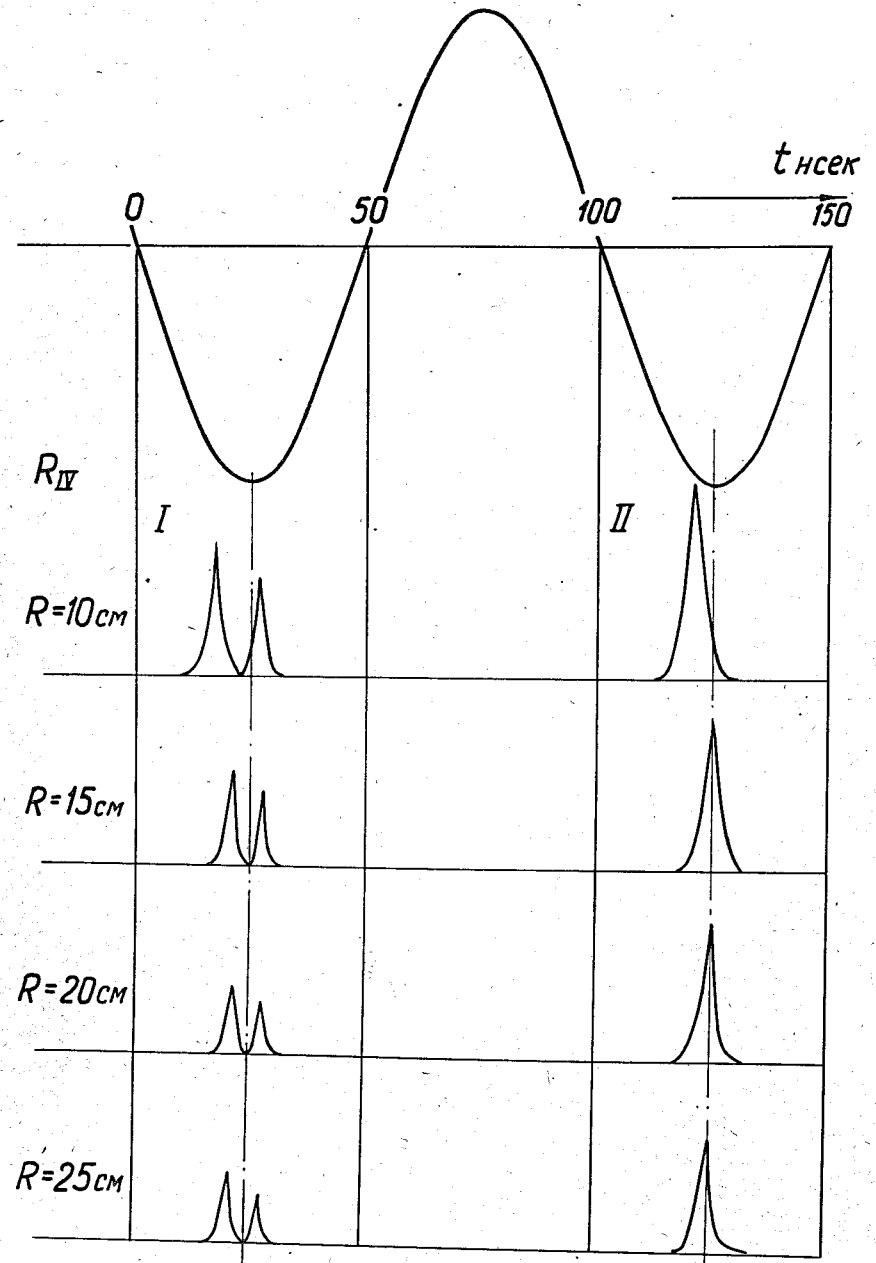


Рис. 11. Форма сгустка ускоренных ионов и его положение относительно синусоиды ускоряющего напряжения. I - без системы отбора, II - с системой отбора.