

С 3500  
Б-733

+

2174 / 81

Богач В.А. и др.

БІ-9-81-43



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

БІ-9-81-43

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1981

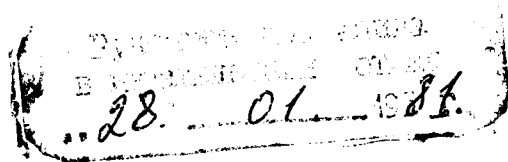
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

51-9-81-43

Богач В.А., Данилов В.И., Максимсв. Ю.В., Плис Ю.А., Полферов Э.А.,  
Розанов Е.И., Сергунин А.С., Сорско Л.М.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ В  
УСТАНОВКУ "Ф"



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
БИБЛИОТЕКА

Дубна, 1981 г.

## Аннотация

Описана установка для моделирования аксиальной инжекции поляризованных протонов в фазотрон. Коэффициент прохождения пучка по тракту с электростатическими линзами и дефлектором составляет 5%. Проведен анализ потерь пучка.



## Введение

Известно, что наиболее эффективным методом инъекции поляризованных ионов в циклотрон является транспортировка их через аксиальное отверстие в магните от источника в межполюсной зазор, где расположен электростатический дефлектор, отклоняющий ионы в плоскость ускорения. Размеры дефлектора, включая экран от в.ч. поля дуантов, должны быть возможно меньшими, чтобы ускоряемые ионы могли без потерь обойти его на первом обороте. Поскольку конструктивно диаметр корпуса дефлектора не может быть сделан меньшим 2,5±3 см, то накладывается ограничение снизу на амплитуду в.ч. поля. Минимально допустимое значение последней зависит от типа ускоряемых частиц, величины магнитного поля, геометрии центральной области, энергии инжектируемых ионов и для типичных условий ускорения протонов находится в области 30–50 кВ. Оптимальная энергия инъекции должна составлять примерно 20% от амплитуды напряжения на дуанте  $\frac{1}{I}$  (в системе с одним дуантом).

В связи с планируемым ускорением поляризованных протонов в фазотроне с пространственной вариацией магнитного поля с целью отработки элементов системы был создан стенд аксиального инжектора. Соответствующие расчеты, на которых основывалось конструирование установки, были представлены ранее /2/.

## I. Общее описание установки

Стенд аксиального инжектора создан на базе электромагнита СП-47Б с диаметром полюсов 500 мм, в которых просверлены аксиальные отверстия длиной 882 мм и диаметром 100 мм (рис.1). Ось системы лежит в горизонтальной плоскости.

Ионы водорода, вытягиваемые из в.ч. источника 1, ускоряются и формируются в пучок ионно-оптической системой 2. Квадрупольные электростатические триплеты 3, 4 и 5 с апертурой линз 36 мм фокусируют пучок, движущийся вдоль оси магнита 6. В различных точках тракта инъекции ионный ток измеряется цилиндрами Фарадея 7-II. Два триплета (4 и 5) укреплены внутри стальной трубы 12 с диаметром 100x8, соединяющейся вакуумплотно с камерой 13. Стальные крышки камеры толщиной 50 мм являются продолжением полюсов магнита. Величина межполюсного зазора, также, как в установке "Ф", выбрана равной 120 мм. В межполюсном зазоре расположен электростатический дефлектор 14.

Была предусмотрена возможность анализа пучка по массам специальным электромагнитом. Однако это приводило к большой потере в интенсивности, и в описываемых экспериментах использовался пучок, состоящий из смеси ионов  $H_1^+$  и  $H_2^+$ .

Для отклонения пучка в медианную плоскость используется электростатическое отражающее "зеркало", впервые примененное в Бирмингеме / 1 /. Конструкция дефлектора схематически представлена на рис.2. Плоскость отражателя 1, изготовленного из нержавеющей стали, расположена под углом  $45^\circ$  к медианной плоскости. Сетка 2 находится на расстоянии 4,5 мм от отражателя. Она сплетена из вольфрамовой проволоки диаметром 50 мкм, размер ячейки - 1x1 мм.

Изолятор 3 выполнен из кварцевого стекла, а изолятор 4 - из нитрида бора. Корпус 5 дефлектора (материал - нержавеющая сталь) установлен на жестком шасси 6, перемещающемся по крышке камеры (см. рис.1).

Конструктивно была предусмотрена возможность автономной работы аксиального инжектора вне магнита СП-47Б. При расстыковке тракта от магнита система поворачивалась на несущей платформе, и квадрупольные линзы закрывались дополнительной вакуумной трубой.

Вакуум в объеме тракта инжекции создавался двумя паромасляными насосами ВА-01-1 с производительностью 100 л/с. Камера откачивалась насосом ВА-2-3 (быстрота откачки 500 л/с). Фороткачка обеспечивалась механическим насосом ВН-6. Вакуум мог измеряться только в части тракта, расположенной вне магнита (ионизационные лампы установлены на выходе ионного источника и между 1-м и 2-м триплетами). В рабочих условиях вакуум составлял  $(2-3) \cdot 10^{-5}$  Тор.

## 2. Ионный источник

На стенде аксиальной инжекции источник поляризованных протонов имитировался в.ч. ионным источником (рис.3) типа источника, описанного в работе Романова и Сербинова /3/.

Водород поступает в разрядную колбу источника через палладиевый фильтр. Давление водорода в системе газоподачи составляет около 2 атм., ток нагрева палладиевой трубки - до 11 А. Расход водорода равен приблизительно  $4 \cdot 10^{-3}$  л.Тор/с.

Для передачи мощности в разряд от в.ч. генератора использовалась индуктивная связь. Генератор, выполненный по двухтактной схеме на металлокерамических триодах ГИ-7Б, характеризуется сле-

дующими рабочими параметрами: частота - 40 МГц, девиация частоты -  $\pm 100$  кГц, выходная мощность - не менее 100 Вт, потребляемая мощность - примерно 200 Вт.

Ионно-оптическая система источника позволяет ускорять ионы до энергии приблизительно 10 кэВ. В качестве изоляторов используется стекло. Стеклянные кольца склеивались с металлическими деталями с помощью поливинилаустатной пленки толщиной 0,3 мм. Для склеивания систему надо выдержать под давлением  $3+5$  кг/см<sup>2</sup> в течение 4-5 часов.

Ионный источник мог дать ток: до 300 мкА при диаметре эмиссионного отверстия  $0,6+0,8$  мм. Измерения эмиттанса <sup>/4/</sup> дали величину приблизительно  $1$  см·рад·(эВ)<sup>1/2</sup>, что соответствует значению, принятому при проектировании установки <sup>/2/</sup>.

### 3. Измерения ионного тока

Для измерения тока пучка вдоль тракта инжекции использовались пять датчиков 7-II (см. рис. I).

Датчик 7 (измеряемый ток обозначим  $J_1$ ) расположен на выходе ионного источника. Перед ним имеется диафрагма с набором отверстий от 2 до 7 мм. Кроме того, на датчике укреплено металлическое кольцо с внутренним диаметром 6 мм для контроля режима работы ионного источника при транспортировке пучка вдоль тракта.

Датчик 8 (измеряемый ток -  $J_2$ ) и датчик 9 (ток  $J_3$ ) размещены на расстоянии около 30 см с целью определить возможные потери пучка при рассеянии на остаточном газе.

На входе в магнитный зазор располагался датчик 10 (ток  $J_4$ ). Отношение токов  $J_4 / J_1 = K_{14}$  определяет коэффициент прохож-

дения пучка через систему триплетов.

В корпусе дефлектора имеется отверстие диаметром 6 мм, через которое проходит пучок. В отсутствие на отражателе высокого потенциала измерялся ток на него ( $J_{\text{отр.}}$ ). Специальный датчик II измерял отклоненный ток ( $J_{\text{откл.}}$ ).

Для изучения прохождения пучка внутри двух ближних к центру триплетов использовалась перемещающаяся алюминиевая труба длиной 140 см с наружным диаметром 18 мм.

#### 4. Измерения магнитного поля

Для измерения магнитного поля внутри отверстия и в камере использовалась штанга с укрепленным на ее конце датчиком Холла, обеспечивающим точность измерений 1%. По измерениям поля в центре магнита в зависимости от тока возбуждения получена кривая намагничивания (рис.4). Магнитное поле той же величины, что в центре магнита установки "Ф" II,9 кГс получается при токе 300 А.

Наличие аксиальных отверстий в полюсах обуславливает радиальную зависимость поля в центральной области. На радиусе выхода протонов из дефлектора (12 мм) поле возрастает примерно на 1% по сравнению со значением в центре. Была измерена также зависимость поля от азимута в средней плоскости магнита на радиусе 50 мм. Относительная величина первой гармоники составляет примерно  $6 \cdot 10^{-4}$ .

Осевая составляющая магнитного поля была измерена на всем протяжении от центра магнита до внешней области за ярмом (рис.5). Оказалось, что поле внутри отверстия меняется сложным образом в зависимости от насыщения стали. Максимальная величина осевой составляющей магнитного поля достигает 800 Гс.



Магнитопровод электромагнита СП-47Б в отличие от циклотронов имеет С-образную форму, что приводит к возникновению поперечной компоненты поля на оси отверстия в магните и вне его (рис.6). Измерения показали, что на расстоянии 40-180 мм от внешнего края ярма поперечная компонента превышает 100 Гс. По этой причине все вакуумные кожуха были изготовлены из мягкой стали, а на примыкающем к ярму участке ионопровода длиной 300 мм установлен дополнительный разборный стальной экран. Сократив до приемлемой величины мешающее поле вне магнита, эти меры, однако, не могут оказать влияние на поперечную составляющую поля внутри отверстия, которая достигает 50 Гс и определяется асимметрией магнитопровода.

## 5. Результаты экспериментов

Все описываемые ниже эксперименты проводились при энергии ионов 10 кэВ.

Вначале было исследовано прохождение пучка через тракт аксиальной инъекции в отсутствие магнитного поля. Оказалось, что при оптимальных напряжениях на квадрупольных линзах коэффициенты прохождения пучка через отдельные участки тракта  $K_{12} = J_2 / J_1$ ,  $K_{14} = J_4 / J_1$  и  $K_{24} = J_4 / J_2$  падают с увеличением ионного тока на входе системы. Из рис.7 видно, что  $K_{12}$  достигает 100% при  $J_1 \approx 10$  мкА, полный коэффициент прохождения через все триплеты  $K_{14}$  в этих условиях составляет 50%.

Включение номинального магнитного поля СП-47Б приводит к существенному (в несколько раз) уменьшению коэффициента прохождения  $K_{14}$ , что обусловлено, по-видимому, поперечной компонентой магнитного поля на оси отверстия. Оптимальные потенциалы на линзах при этом изменялись по сравнению со случаем транспортировки

без поля СП-47Б. На входе в межполюсной зазор резко возрастающее поле сильно фокусирует пучок. Измерения профиля пучка перемещающимся датчиком тока  $J_4$  с коллиматором диаметром 2 мм дали ширину пучка без магнитного поля - 10 мм, с полем - 4 мм. Поскольку входная диафрагма в корпусе дефлектора имеет диаметр 6 мм, то большая часть пучка должна попасть внутрь дефлектора и отразиться.

На рис.8 приведено типичное распределение ионного тока вдоль оси внутри магнита на перемещающийся датчик диаметром 18 мм при оптимальных напряжениях на линзах (центр камеры на графике соответствует  $L = 0$ ).

В экспериментах с отклонением пучка дефлектором в поле, близком к номинальному (11,9 кГс), были сняты зависимости  $J_{откл.}$  от потенциала отражателя дефлектора  $U_{дефл.}$  (рис.9) и от тока возбуждения магнита  $I_{пр.}$  (рис.10) при  $U_{дефл.} = 10$  кВ. Максимальная эффективность прохождения через тракт и дефлектор для  $B = 11,9$  кГс получена при входном токе  $J_1 = 15$  мкА и  $U_{дефл.} = 10$  кВ. В этих условиях получено:  $J_4 = 2$  мкА,  $J_{отр.} = 1,6$  мкА и  $J_{откл.} = 0,7$  мкА, что соответствует полному коэффициенту трансмиссии аксиального инжектора около 5%.

### Заключение

1. На стенде аксиального инжектора при работе без магнитного поля достигнута 50%-ная эффективность прохождения пучка ионов водорода от высокочастотного ионного источника до входа в камеру.


2. При включении номинального поля (11,9 кГс в центре межполюсного зазора) вышеупомянутая эффективность уменьшается примерно в 5 раз.

3. Потери при отклонении пучка электростатическим дефлектором составляют примерно 60% при геометрической прозрачности для двукратного прохождения сетки 80%.

4. Полный коэффициент прохождения через аксиальный инжектор падает с ростом ионного тока на входе, при токе 15 мкА он составляет примерно 5%.

5. Потери интенсивности связаны, в основном, с влиянием поперечной компоненты магнитного поля внутри отверстия, отчасти, недостаточно высоким вакуумом вдоль тракта пучка и, возможно, малой апертурой квадрупольных линз для данного эмиттанса пучка. Потери в дефлекторе вызваны тем, что пучок состоит из смеси ионов  $H_1^+$  и  $H_2^+$ , а геометрия оптимизирована для отклонения протонов.

6. Полученный опыт работы и результаты дают основу для проектирования системы аксиальной инжекции для установки "Ф".

  
 Tim  
 Stepanov  
 Руководитель  
 Сергеев  
 В.В. Бочков  
 Марк.

## Литература

1. Clark D.J. et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1969, v.16, No.3, p.471
2. Данилов В.И. и др. ОИЯИ, БИ-9-6889, Дубна, 1972.
3. Романов В.А., Сербинов А.Н. ПТЭ, 1963, № I, с.27.
4. Аносов В.Н. и др. ОИЯИ, 9-1236I, Дубна, 1979.

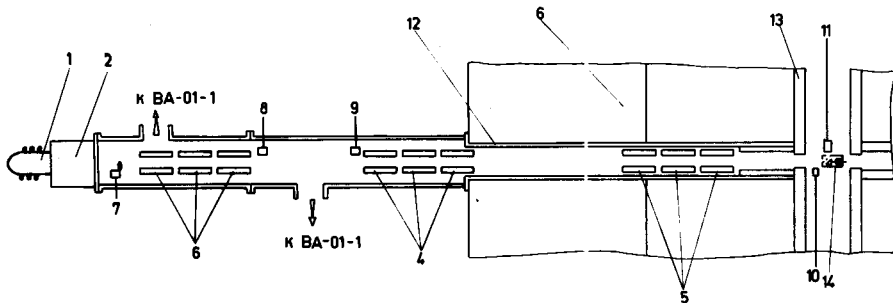


Рис.1 Схема тракта аксиальной инъекции.

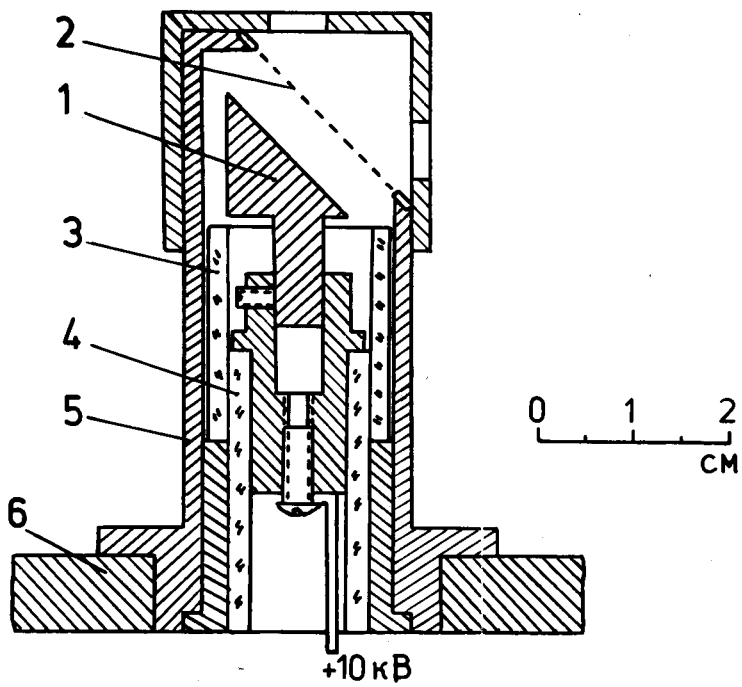


Рис.2 Схематический чертеж дефлектора.



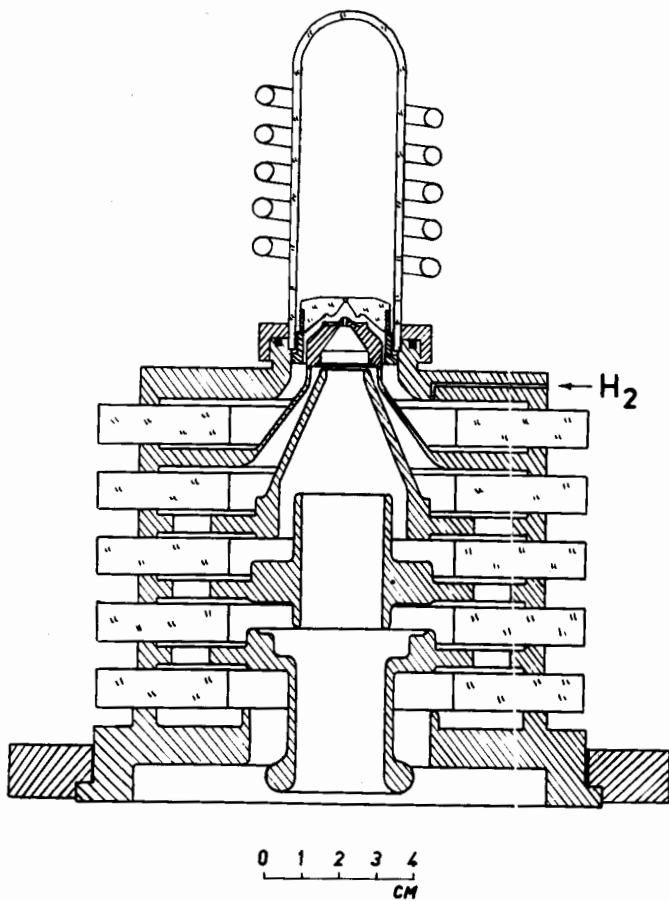


Рис.3 Высокочастотный ионный источник и ионно-оптическая система.

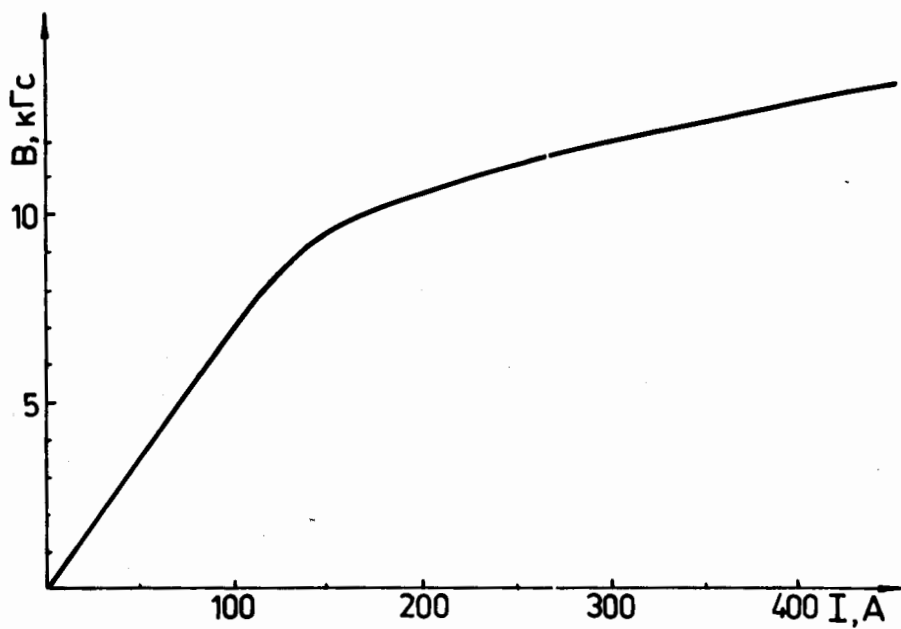


Рис.4 Кривая намагничивания магнита СП-47Б при межполюсном зазоре 120 мм.

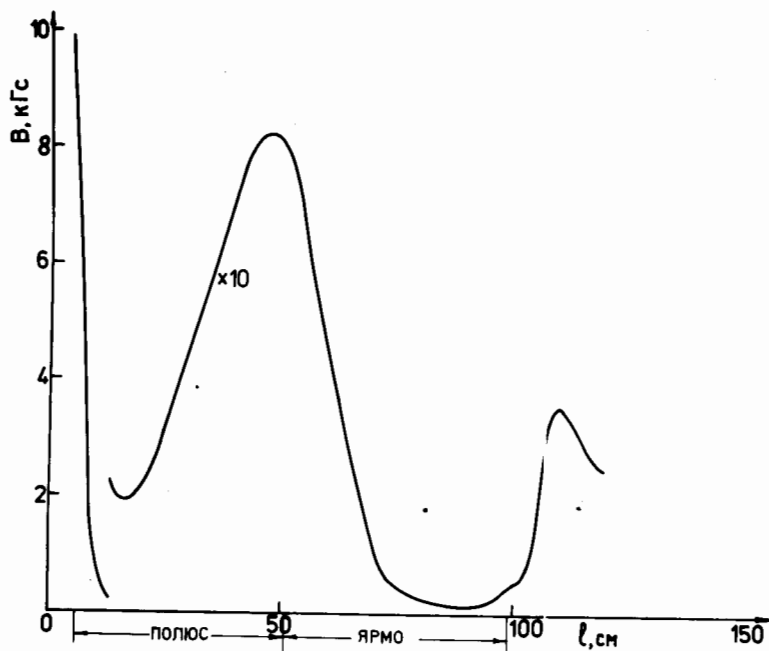


Рис.5 Распределение осевой компоненты магнитного поля вдоль оси отверстия при токе возбуждения 246 А;  $l$  - расстояние от центра магнита.

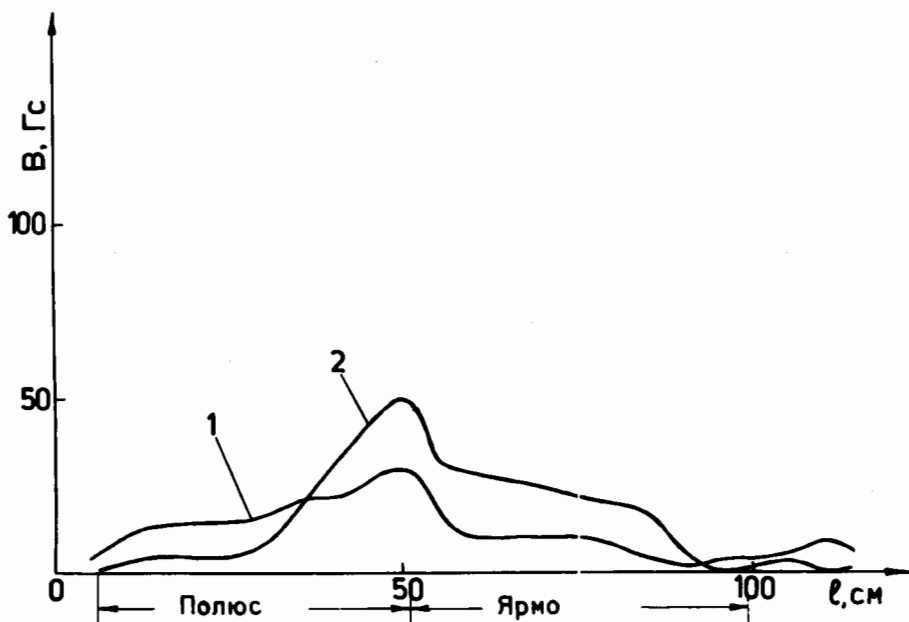


Рис.6 Распределение вдоль оси отверстия горизонтальной (1) и вертикальной (2) компонент магнитного поля;  $l$  - расстояние от центра магнита.

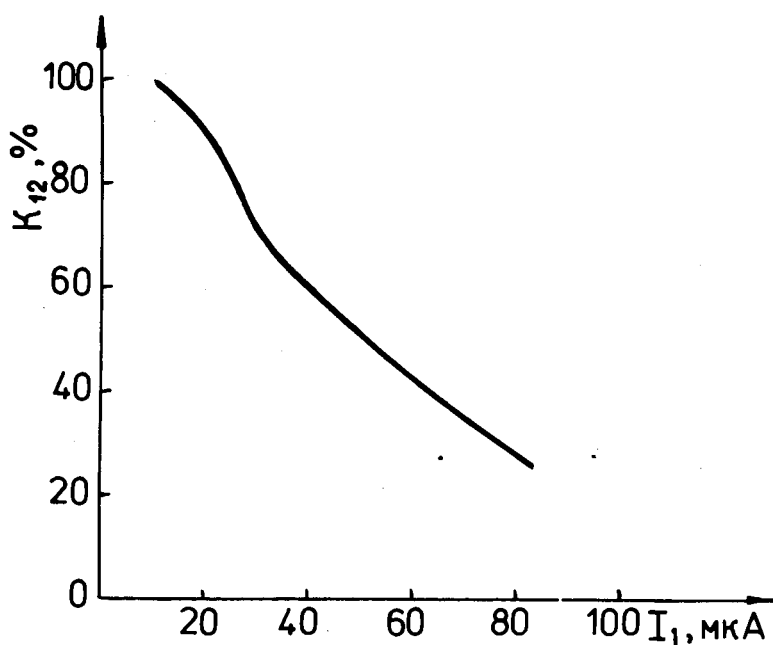


Рис.7 Зависимость коэффициента прохождения через первый триплет  $K_{I2}$  от тока на входе тракта  $I_I$  (в отсутствие поля).

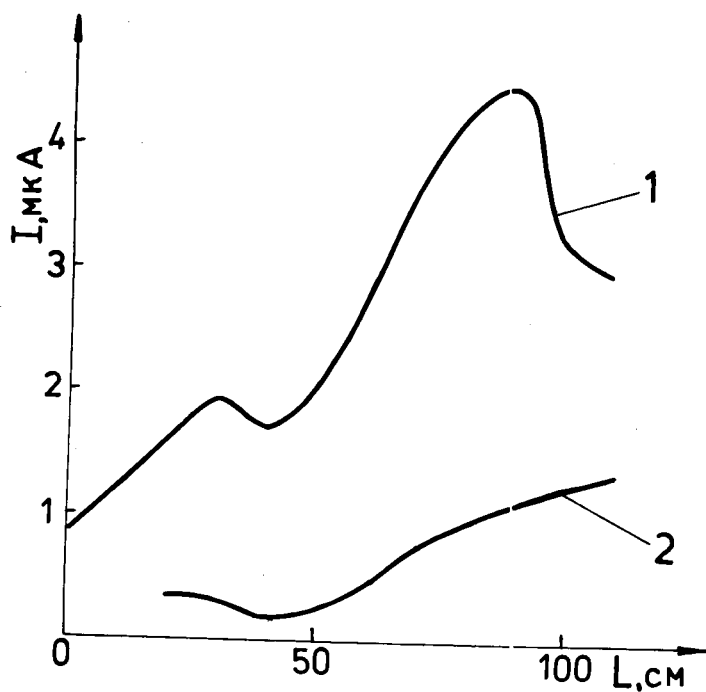


Рис.8 Распределение ионного тока вдоль оси тракта в отсутствие поля (1) и с магнитным полем (2).

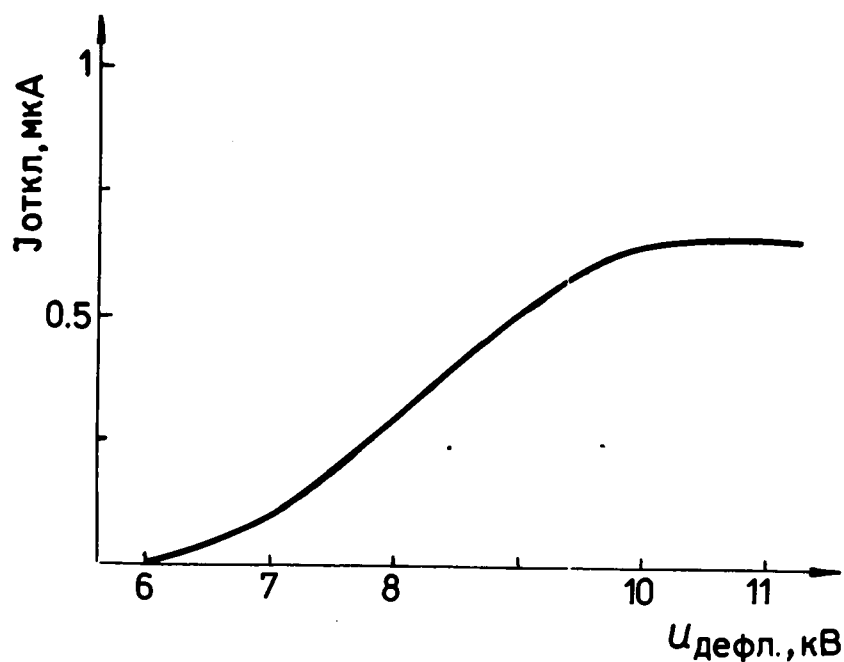


Рис.9 Зависимость отклоненного тока  $I_{откл.}$  от потенциала отражателя дефлектора  $U_{дефл.}$ .

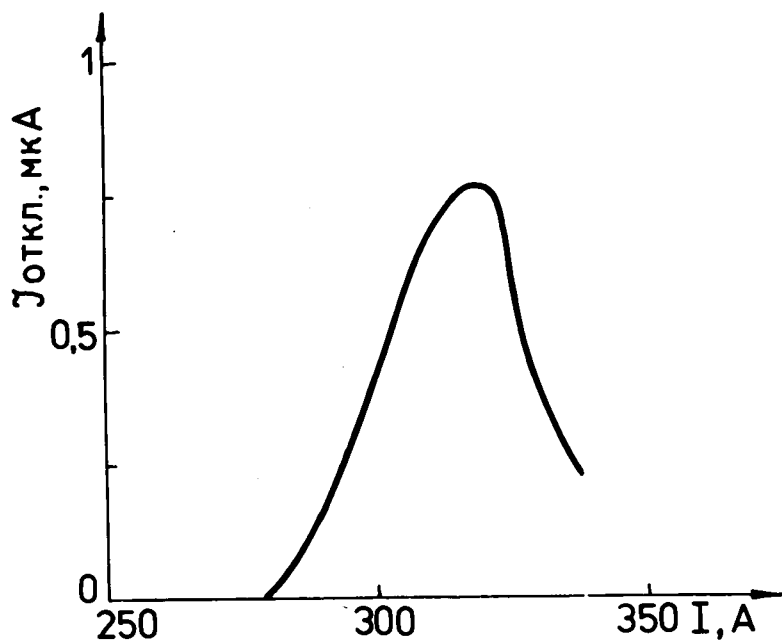


Рис.10 Зависимость отклоненного тока  $I_{откл.}$  от тока возбуждения магнита СП-47Б.