

С3454  
Т-238

7/10 - 1969г.

**9 - 4368**

**Т.Таут, И.А.Шелаев, Г.М.Соловьева**

**ИСТОЧНИК ЛЕГКИХ ИОНОВ  
ДЛЯ ЦИКЛОТРОНА У-200**

9 - 4368

Т. Таут, И. А. Шелаев, Г. М. Соловьева

ИСТОЧНИК ЛЕГКИХ ИОНОВ  
ДЛЯ ЦИКЛОТРОНА У-200

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

2799/1 нр.

## 1. Введение. Конструкция источника

На изохронных циклотронах, ускоряющих тяжелые ионы, магнитное поле формируется для определенных значений  $\frac{A}{Z}$ , что не позволяет непосредственно разогнать легкие частицы. Тем не менее ряд работ, выполняемых в ЛЯР, требует пучков протонов и  $\alpha$ -частиц<sup>/1,2/</sup>. Их получение представляется возможным путем ускорения ионов  $H_3^+$  и  $He_3^+$  методом, предложенным Г.М.Флеровым. Указанные частицы имеют величину  $\frac{A}{Z} = 3$ , которая находится в диапазоне, доступном для У-200. В связи с этим возникла необходимость создания источников  $H_3^+$  и  $He_3^+$ , способных поставлять нужные ионы.

Получение  $H_3^+$  описано в литературе<sup>/3,4/</sup> сравнительно бегло. Судя по имеющимся данным<sup>/5/</sup>, из всех процессов, приводящих к образованию  $H_3^+$ , наибольшее сечение имеет реакция



Отсюда следует, что в источнике нужно создать условия, обеспечивающие присутствие молекулярных ионов и нейтральных молекул водорода. Как известно, это режимы маломощные, с низким потенциалом разряда.

Следует помнить, что энергия связи  $H_3^+$  оценивается в 4,18 эв, а сечение перезарядки, которое может привести к потере ионов,  $\sigma \approx 10^{-14} \text{ см}^2$ . Из вышесказанного ясно, что, несмотря на внушительные значения сече-

ния образования  $H_3^+$ , конкурирующие процессы значительно снижают токи трехатомных молекул водорода. При ускорении на изохронной машине могут возникнуть и другие причины, приводящие к развалу уже сформированной частицы. Рассмотрению этого вопроса посвящена работа /6/.

Получение  $He_3^+$  особых затруднений не вызывает. Для этого нужен также разряд маломощный, со сравнительно низким потенциалом. Потери частиц, помимо рассеяния, может вызвать лишь дополнительная ионизация во время ускорения.

Необходимость создания высокого вакуума, продиктованная особенностями ускорения  $H_3^+$ , а также возможностями потерь  $He_3^+$  путем перезарядки, приводит к выбору источника закрытого типа. Для обеспечения преобладания элементарных процессов, ведущих к формированию  $H_3^+$  (молекулы  $H_2^+$  и  $H_2$ ), целесообразно применить маломощный дуговой разряд и сравнительно широкую камеру. Конструктивно эти условия сводятся к созданию источника с прямым подогревом, с заземленным (для  $H_3^+$ , где нет необходимости в повторной ионизации) или плавающим (для  $He_3^+$ ) антикатодом.

При конструировании источника нужно учесть:

- радиальное его расположение;
- необходимость обеспечения минимального сечения немагнитного пространства, что связано с уменьшением провала магнитного поля в медианной плоскости центральной части ускорителя;
- удобства смены нити и головки (газоразрядной камеры);
- отвод сравнительно большого количества тепла с нитедержателей (ток нагрева для вольфрамовой нити  $\rho = 3\text{ мм}$  порядка  $500\text{ А}$ );
- высоту зазора между полюсами электромагнита (83 мм) и др.

Плазма низкого давления находится, строго говоря, в "кривом" поле центральной зоны и следует (так как радиусы кривизны электронов  $\approx 10^{-3}\text{ см}$ ) искривлениям силовых линий. Для того, чтобы оценить горизонтальное смещение шнура, исходим из величины магнитного поля в медианной плоскости. С помощью соотношения

$$B_r = z \left( \frac{\partial B_r}{\partial z} \right)_{z=0} + \frac{z^2}{2} \left( \frac{\partial^2 B_r}{\partial z^2} \right)_{z=0} + \dots \quad (2)$$

найдем значение поля для различных  $z$ .

В постоянном поле

$$\text{rot } \vec{B} = 0.$$

Следовательно,

$$\left( \frac{\partial B_r}{\partial z} \right)_{z=0} = \left( \frac{\partial B_z}{\partial r} \right)_{z=0}. \quad (3)$$

Исходя из картины поля можно рассчитать  $\left( \frac{\partial B}{\partial r} \right)_{z=0}$ , а также  $\left( \frac{\partial^2 B_z}{\partial r^2} \right)_{z=0}$ . Получаем  $400\text{ гс/см}$  и  $40\text{ гс/см}^2$  соответственно.

Соотношение (2) в данном случае можно записать в виде

$$B_r = 400 z + 20 z^2. \quad (4)$$

Электроны, находящиеся в плазме, будут двигаться приблизительно вдоль силовых линий, "прогиб" которых и определяет смещение разрядного столбика. Его можно найти исходя из наклона силовых линий:

$$\frac{dz}{dr} = \frac{B_z}{B_r} = \text{tg } \phi. \quad (5)$$

Предположим, что  $B_z = B_0 = 20\text{ кгс}$ . Подставляя в (5) значение  $B_r$  из (4), получаем:

$$\frac{dz}{dr} = \frac{20000}{400 z + 20 z^2} = \frac{1000}{20 z + z^2}. \quad (6)$$

Интегрируя от  $r_1$  до  $r_2$  и от 0 до  $z$  уравнение

$$(20z + z^2) dz = 1000 dr,$$

получим значение смещения:

$$\Delta r = \frac{z^2}{100} + \frac{z^3}{300}, \quad (7)$$

где  $\Delta r$  измеряется в сантиметрах.

Для разных высот по  $z$  можно составить следующую таблицу.

Таблица

$z$ (см)	0	1	2	3
$\Delta r$ (см)	0	0,010033	0,040270	0,090900
$\Delta r$ (см)	0	0,000000	0,034000	0,086000

Смещение разрядного столбика можно проверить и графоаналитическим методом. Для этого следует вычислить  $|B_r|$ ,  $\operatorname{tg}'\phi$  и  $\phi'$  при разных значениях  $z$ , построить касательные и провести к ним силовую линию. Полученные таким образом величины приведены во второй строке таблицы.

Мы ограничились высотой 3 см, половиной величины зазора между полюсными наконечниками, что и определяет длину газоразрядной камеры.

Между катодом прямого накала и камерой поставлена вогнутая диафрагма с продолговатым отверстием 2 x 3 см. Плоскость нити накала и соответствующая ей ось симметрии цилиндрической диафрагмы, а также положение отверстия выбраны таким образом, чтобы смещенная в магнитном поле плазма попала в район центра линзы. Положение диафрагмы регулируется.

Молибденовая линза для вытягивания ионов размещена таким образом, чтобы ее геометрия совпала с проведенными ранее расчетами движения частиц в центре циклотрона.

Внешние размеры головки источника и ее форма выбраны так, чтобы разрядный путь вдоль силовых линий магнитного поля от вытягивающего электрода и до корпуса источника, находящегося под потенциалом земли, был бы максимальным.

Подвод газа дифференциальный. Для обеспечения устойчивости плазмы имеется одно отверстие ( $\phi = 1,5$  мм) вблизи диафрагмы, а для создания "обмывающего потока" - другое, расположенное в центральной части камеры.

Один из вариантов головок источника (для  $N_3^+$ ) имеет ввинчивающийся молибденовый антикатод, другой (для  $He_3^+$ ) - изолированный, плавающий.

Смена нити производится без открытия головки с помощью снятия с фишек нитедержательных башмачков. Отвод тепла обеспечивается водяным контуром с минимальным сечением 19 мм<sup>2</sup>. При конструировании выборка из стальной болванки, проходящей через пробку из Ст-3, была сведена к минимуму. Она соответствует, за исключением незначительной части ее длины, круговому сечению с  $\phi = 17$  мм. Провал поля в медианной плоскости при этом оценивается в несколько сот эрстед.

Источник шлюзуется. Его внешние размеры и устройство шлюзования созданы на основании ранее разработанного варианта для тяжелых ионов. Общий вид источника показан на рис. 1, головка видна на рис. 2. Схема питания, разработанная Ю.И. Богомольцем, показана на рис. 3.

## 2. Характеристики источника

Для снятия характеристик источника мы воспользовались циклотроном У-200. Измерительный зонд передвигался в пределах от 300 до 800 мм по радиусу.

Высокая частота на дуантах имела два значения: 15,196 кгц для  $\frac{A}{Z} = 4$  и 19,998 кгц - для  $\frac{A}{Z} = 3$ . Скважность была постоянной:  $T/\tau = 5$ . Газ подавался под давлением 1 атм через игольчатый вентиль. Счетчик был связан с двигателем управления вентилем и калиброван в см<sup>3</sup>/мин.

Были сняты рабочие характеристики источника, в том числе зависимости ионных токов  $(HD)^+$ ,  $H_3^+$  (с диафрагмой и без нее),  $He_3^+$ ,  $He_4^+$  и  $D_2^+$  от напряжения и тока дуги (рис. 4 и 5). Каждая кривая снималась при соблюдении постоянства остальных параметров. При этом значение последних было выбрано оптимальным. Постоянство электрических параметров осуществлялось путем регулировки тока накала нити.

По оси ординат (рис. 4-9) отложены средние значения ионных токов. Учитывая, что в.ч. генератор работал со скважностью  $T/\tau = 5$ , для получения интенсивности тока в импульсе средние значения нужно умножить на 5.

Зависимости ионных токов от расхода газа (рис. 6) снимались для оптимального режима источника. Нам показалось более удобным построить кривые в зависимости от поворота игольчатого вентиля, измеряемого в делениях шкалы. Калибровочная кривая приведена на рис. 10. Гелий, дейтерий и водород подавались в чистом виде из резинового баллона. Для получения  $(HD)$  была приготовлена смесь с примерным процентным составом 50% + 50%.  $He_3$  перемешивался с  $He_4$  (в металлическом баллоне) с объемным соотношением 1/3.

При снятии пусковых характеристик ( $R = 300$  мм) пришлось кривые отнормировать по максимальному напряжению на дуантах (оно обозначено через  $U$ ). Такая необходимость возникла в связи с тем, что не для каждого ионного тока удалось поднять  $2U_{дд}$  до 150 кв. При большой нагрузке ( $> 200$  мка) напряжение на дуантах падает. Благодаря такой нормировке, на рис. 7 незаметны некоторые смещения кривых относительно абсцисс. Однако такого рода неточность нам не представляется значительной, так как она не влияет на вид и характер кривой.

Радиальные распределения (рис. 8) на больших радиусах ( $R > 500$  мм) имеют сугубо качественный характер, так как при их снятии не проводилась корректировка магнитного поля катушками.

Источник легких частиц на циклотроне У-200 можно поворачивать, находя оптимальное положение по максимуму ионного тока. На рис. 9 показана зависимость последнего от положения головки относительно

вытягивающего пуллера. Перемещения измерялись в миллиметрах на верхней крышке источника. 1 мм соответствует примерно  $1^\circ 10'$ .

Давление внутри ускорительной камеры зависело от расхода газа и составляло  $8 \cdot 10^{-6} - 1,8 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст.

Измерения проводились с помощью радиального зонда, перемещаемого дистанционным приводом.

Источник работал в постоянном режиме. Антикатоде находился при потенциале анода (плавающий антикатод, как это показали измерения, не давал лучших результатов).

### 3. Обсуждение результатов

Кривые на рис. 4,5,6 имеют ярко выраженные максимумы. Как видно, имеющиеся смещения в сторону больших или меньших напряжений на рис. 4 нельзя объяснить просто на основании ионизационных потенциалов данного газа. По-видимому, здесь нужно учесть совокупность всех явлений, происходящих при горении плазменного шнура в данном режиме. Они приводят к определенным средним энергиям и потокам частиц в разряде, что влияет на выход интересующих нас ионов. Подтверждением такого положения является, например, сдвиг кривой  $H_3^+(\partial)$ , полученной при работе источника с диафрагмой, влево, по сравнению с кривой для той же частицы, но в режиме без диафрагмы. Одновременное смещение той же самой зависимости в сторону больших токов (рис. 5) легко объясняется тем, что часть плазмы экранирована диафрагмой.

Кривые на рис. 6 и 10 показывают, что расход газа для оптимального режима значительный. Работать при  $Q = 2-3$  см<sup>3</sup>/мин на этом источнике, по-видимому, невозможно не только потому, что полученные токи резко снижаются, но и потому, что разряд становится неустойчивым, гаснет и ток накала нити нужно доводить до верхнего предела.

Максимумы кривых  $H_3^+$ ,  $(HD)^+$  и  $D_2^+$  лежат при одних и тех же значениях  $Q$ , а для гелия ( $He_3^+$  и  $He_4^+$ ) они сдвинуты в сторону больших расходов газа.

Пусковые характеристики (рис. 7) частиц, содержащих водород, имеют все один и тот же наклон — немного меньше, чем общий наклон кривых для гелия ( $He_3^+$  и  $He_4^+$ ).

Радиальные распределения до небольших радиусов ( $R \leq 500$ ) могут дать некоторые сведения о газокINETических потерях частиц. Для получения более подробной информации необходима точная подстройка поля и выбор токов корректирующих катушек.

О влиянии геометрии центра на захват ионов на орбиту говорят и кривые рис. 9. Более ярко выраженный максимум для  $H_3^+(\theta)$  указывает, очевидно, на тот факт, что в случае плазмы с пространственным ограничением ток очень чувствителен к положению разряда.

В заключение можно сказать, что данная конструкция хорошо выдерживает длительные рабочие режимы, не перегревается, отличается стабильностью и дает достаточно высокие интенсивности ионных пучков.

Как и можно было ожидать по соображениям, изложенным в разделе 1, для  $H_3$ , где образование иона происходит в периферийной области шнура, головка работает с диафрагмой.

Авторы приносят глубокую благодарность Г.Н.Флерову за постановку задачи и постоянный интерес к работе, В.М.Плотко за сборку источника и ценные советы; В.С.Алфееву и начальникам смены циклотрона У-200 за помощь, оказанную при снятии экспериментальных характеристик.

#### Л и т е р а т у р а

1. G.N.Flerov, *Rev.Rom.Phys.*, 12, 1, 109 (1967).
2. Г.Н.Флеров и др. Препринт ОИЯИ, P7-3065, Дубна, 1966.
3. S.P.Stevenson and D.O.Schisser, *J.Chem.Phys.*, 29, 2, 282 (1958).
4. N.Robert, Varney, *Ionisation Phenomena in Gases*, Munich, 1961, 1, 42.
5. N.Robert, Varney, *Phys.Rev.Lett.*, 5, 12, 559 (1960).
6. T.Tauth, *Rev.Rom Phys.*, 3, 1 (1969).

Рукопись поступила в издательский отдел  
21 марта 1969 года.

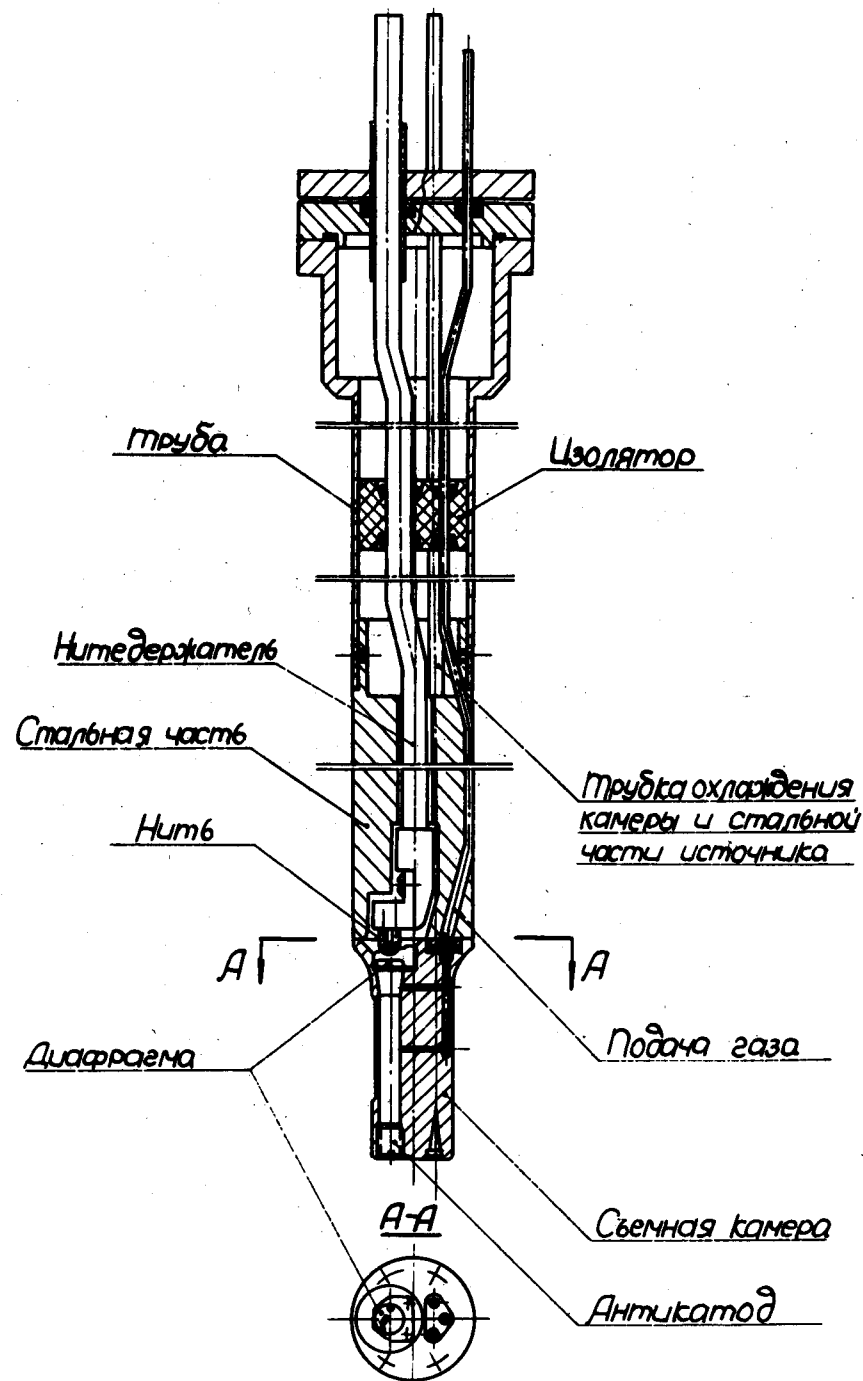


Рис. 1. Общий вид источника ионов.

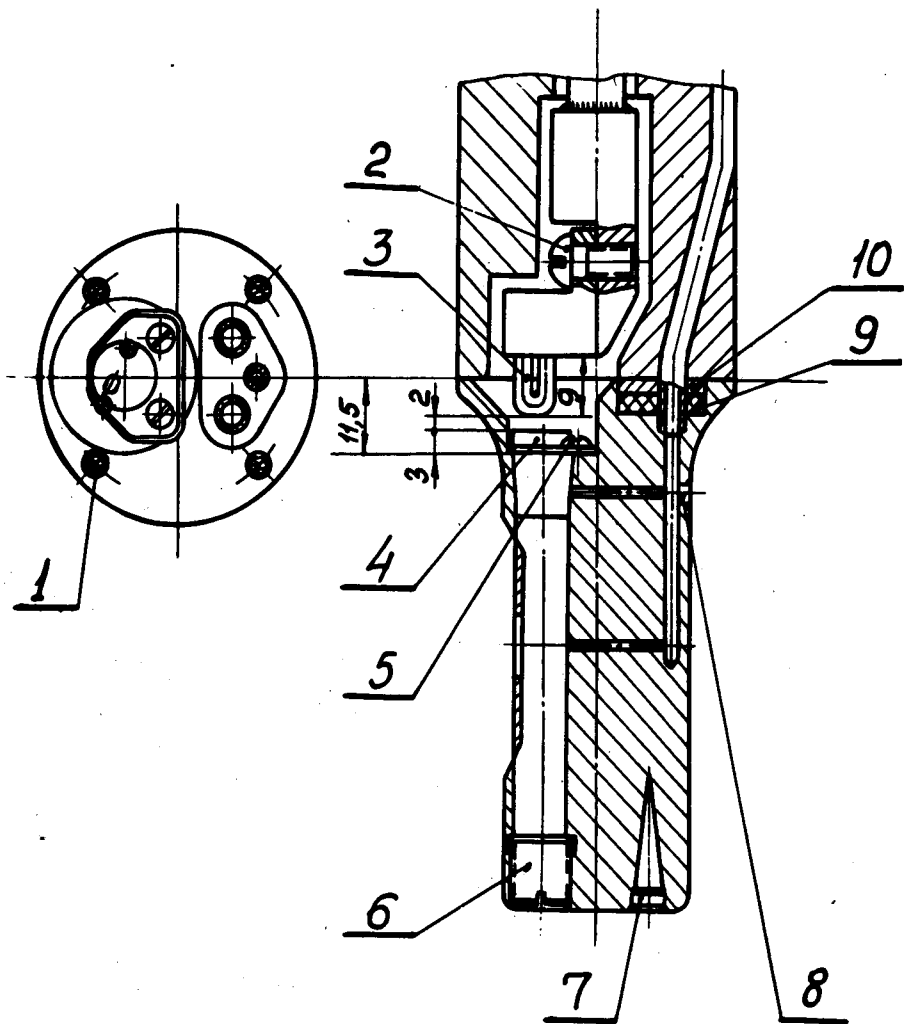


Рис. 2. Головка источника. 1 - крепежные отверстия, 2 - болт, 3 - нить накала, 4 - диафрагма, 5 - крепление диафрагмы, 6 - антикатод, 7 - канал охлаждения, 8 - пробка, 9 - прокладка уплотняющая, 10 - шайба.

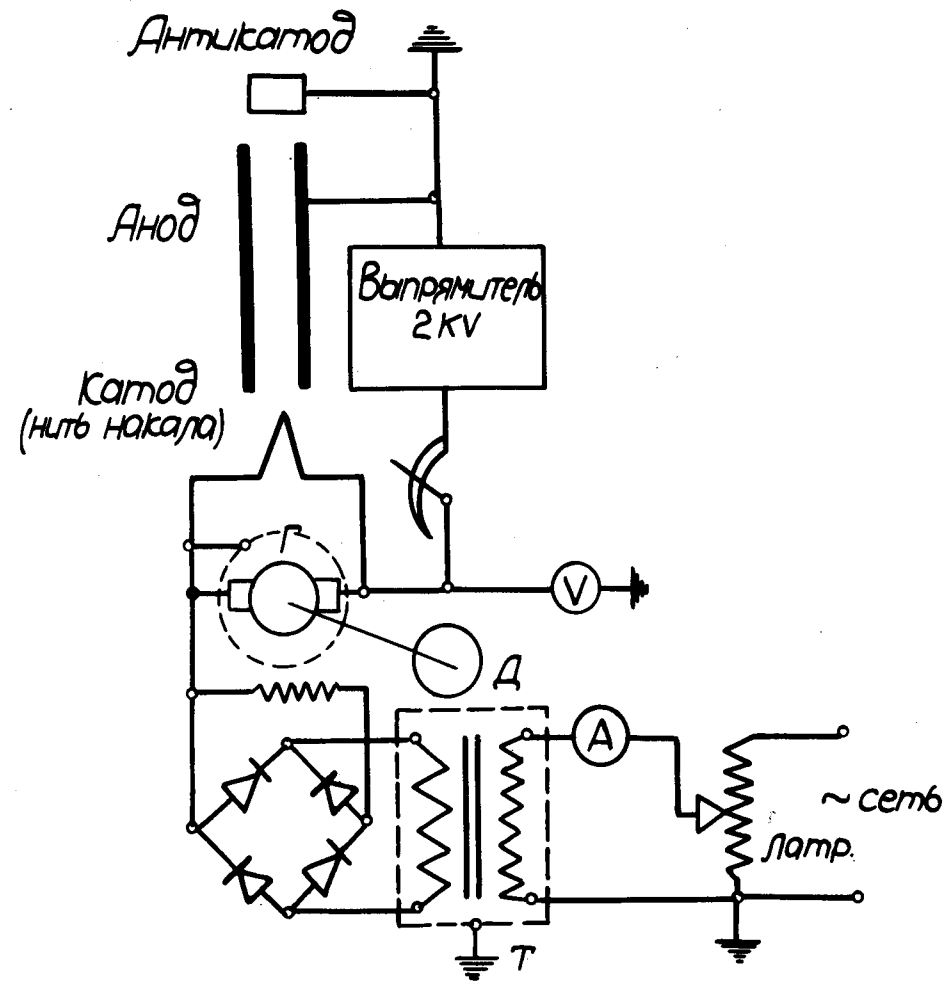


Рис. 3. Принципиальная схема питания источника  $H_3^+$ .



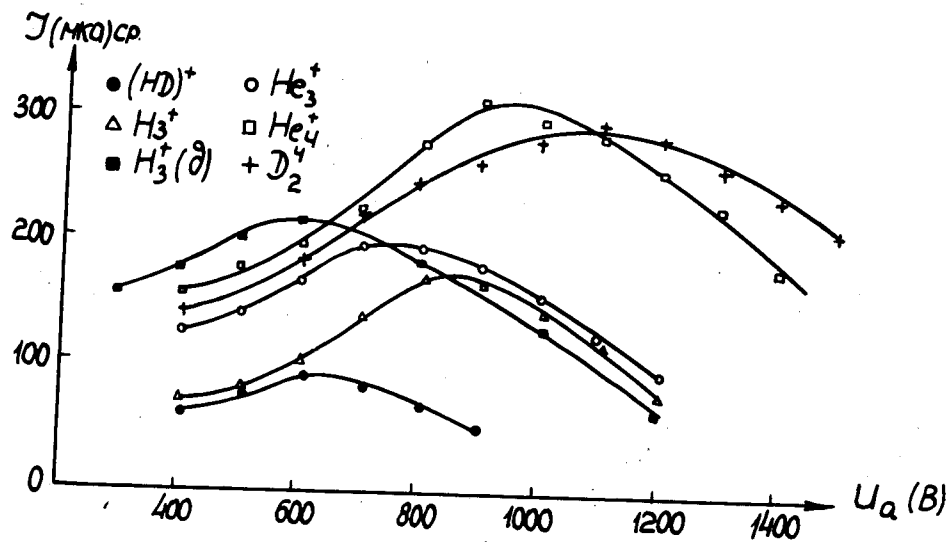


Рис. 4. Зависимость ионного тока от напряжения дуги.

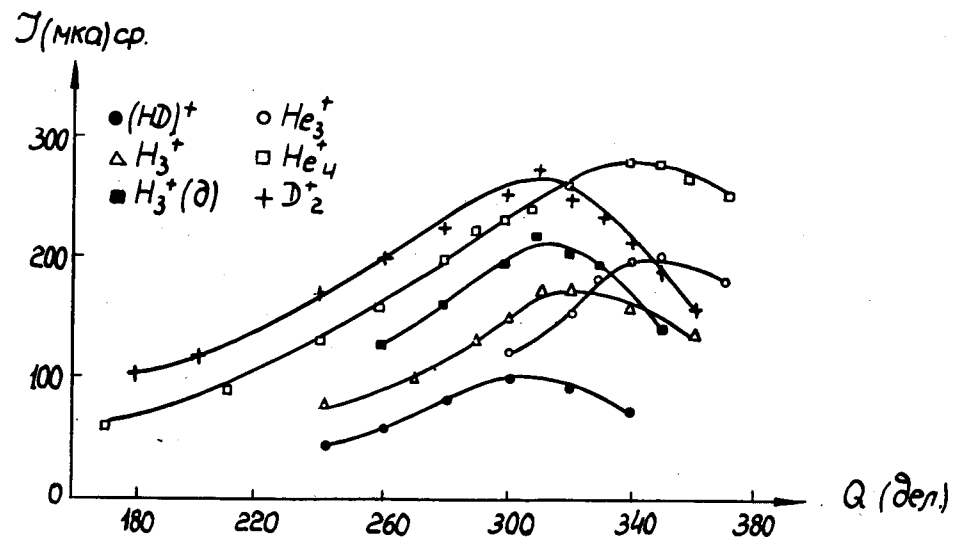


Рис. 6. Зависимость ионных токов от расхода газа.

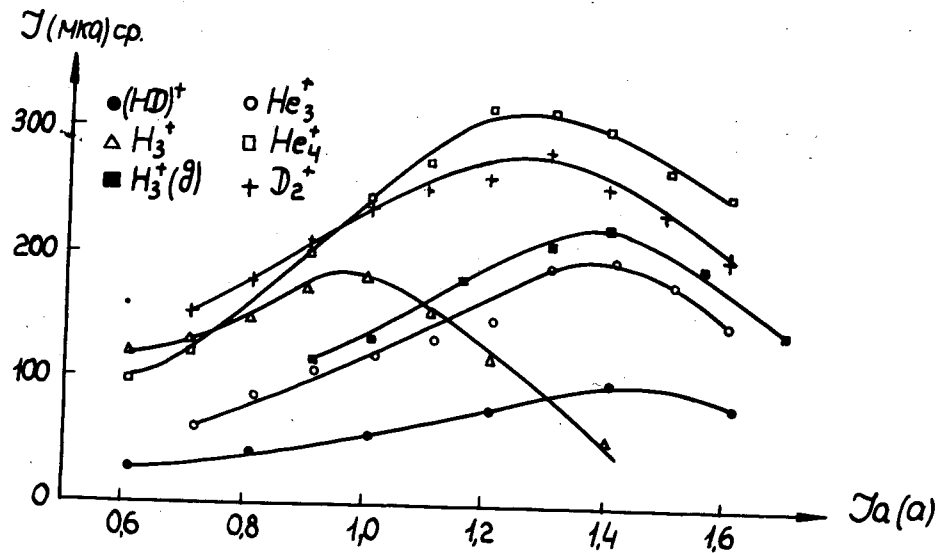


Рис. 5. Зависимость ионных токов от тока дуги.

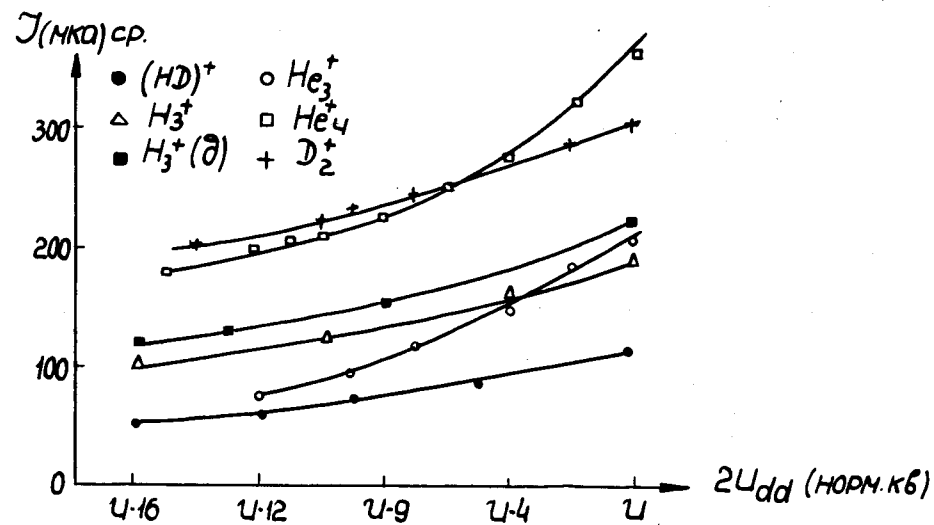


Рис. 7. Пусковые характеристики циклотрона У-200 для легких ионов на радиусе 300 мм.

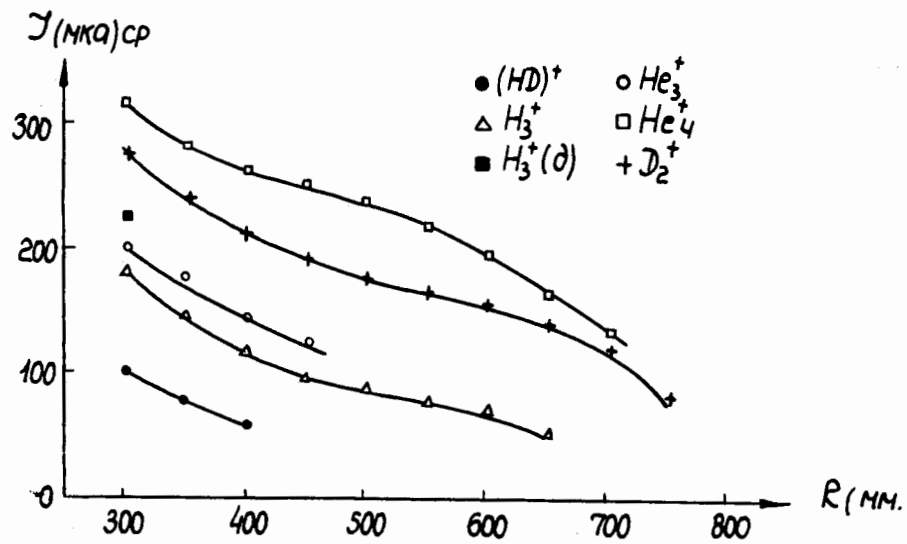


Рис. 8. Радиальное распределение ионных токов в циклотроне У-200.

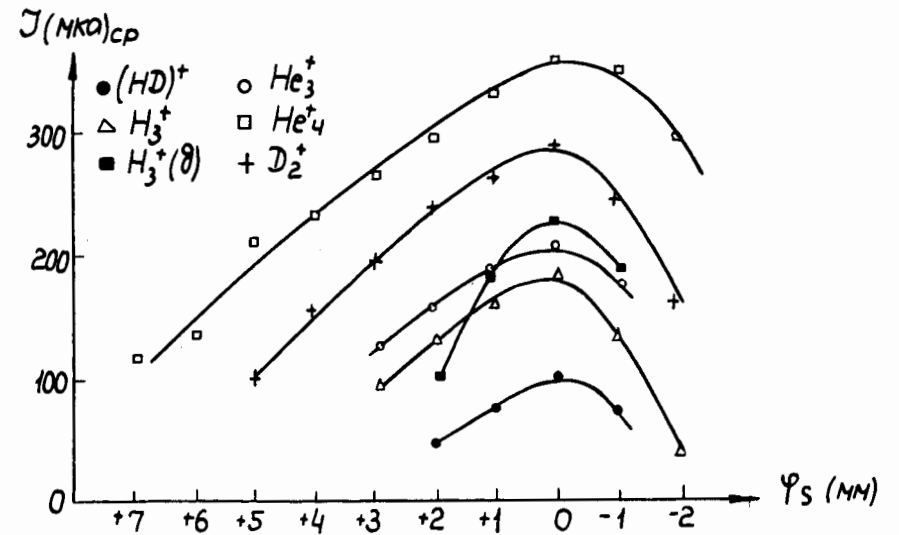


Рис. 9. Зависимость ионного тока от углового перемещения источника.

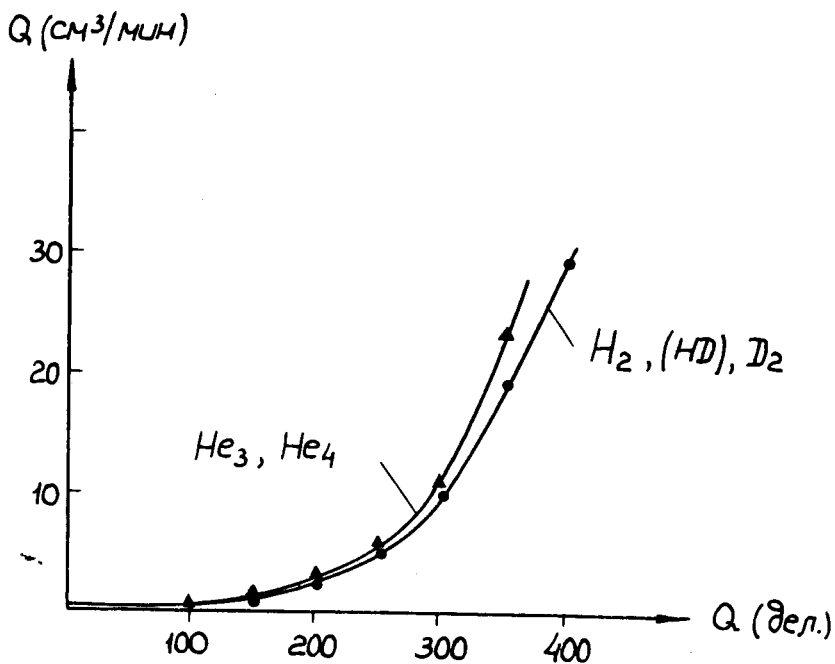


Рис. 10. Калибровочная кривая расхода газа.