

препринт 29

**Г.И. Димов, Ю.Г. Кононенко,
О.Я. Савченко, В.Г. Шамовский**

**Эксперименты по получению интенсивных
пучков ионов водорода**

НОВОСИБИРСК 1966

А н н о т а ц и я

Описывается импульсный дуговой источник водородной плазменной струи, которая используется для получения интенсивного протонного пучка. Был получен протонный пучок интенсивностью до 1,5 а с плотностью тока до 6 а/см^2 с малым содержанием молекулярных ионов.

После перезарядки протонов в водородной мишени получен пучок отрицательных ионов водорода интенсивностью до 4,5 ма с малым поперечным фазовым объемом. Выход отрицательных ионов ограничивается дефокусировкой протонов пространственным зарядом в промежутке между плазмой и отсасывающим электродом.

Описываемые здесь эксперименты проводились в Институте ядерной физики СО АН СССР в связи с разработкой перезарядного метода накопления протонов в ускорителях [1,2]. О первых результатах этих экспериментов сообщалось в [1].

Интенсивность ионных пучков, получаемых от плазменных источников, определяется величиной потока плазмы к отсасывающему электроду и ограничивается пробоем отсасывающего промежутка. Кроме того интенсивные ионные пучки очень трудно сфокусировать, что связано как с действием пространственного заряда, так и с плохой управляемостью плазменной границы. Для получения больших плазменных потоков нами использовался импульсный дуговой разряд. Чтобы преодолеть трудности по управлению плазменной границей, струя плазмы, выходящая из дуговой камеры, направлялась на отсасывающий электрод, представляющий плоскую сетку. Между плазмой и сеткой образуется слой ускоряющихся ионов, толщина которого определяется плотностью тока и отсасывающим напряжением (по закону трех вторых). При большой плотности тока толщина слоя значительно меньше диаметра струи, поэтому отсасывающее электрическое поле близко к однородному, а через сетку выходит почти параллельный пучок ионов.

Получение плазменной струи из дугового разряда

При разработке дугового источника плазменной струи главными задачами были борьба с неустойчивостью дуги, повышение срока службы дуговой камеры и увеличение выхода плазмы. На рис. 1 представлен разрез источника плазменной струи. Дуговая камера длиной 19,5 мм и диаметром 5 мм в прикатодной части на длине 15 мм диафрагмирована. Катод полый, анод конический с отверстием в центре диаметром 3 мм. Полость катода с тыльной стороны соединяется отверстием диаметром 1,2 мм со вспомогательной искровой камерой, которая служит для поджига разряда в дуговой камере. Искровая камера длиной 12 мм и диаметром 5 мм выполнена из кварцевой трубки. Напуск водорода производится через искровую камеру импульсами длительностью 1 мсек с по-

мощью электромагнитного клапана. За анодом установлены две конические диафрагмы для ограничения плазменной струи, выходящей через отверстие в аноде. Выходная коническая диафрагма имеет отверстие диаметром 6 мм.

К концу работы клапана, когда включается дуга, плотность водорода в дуговой камере достигает $2 + 10 \cdot 10^{16}$ мол./см³, в искровой камере в несколько раз выше, а на выходе источника $1 + 6 \cdot 10^{14}$ мол./см³. Для включения дуги на искровую камеру через тиратрон разряжается конденсатор емкостью 0,25 мкф (напряжение 5 кв, амплитуда тока 100 а, длительность тока 5 мксек). Из искровой камеры выбрасывается в полость катода плазма, которая кратковременно эмитирует электроны. Это приводит к разряду формирующей линии, подключенной непосредственно к дуговому промежутку. Описанный способ поджига дуги, в отличие от других опробованных нами, не приводит к появлению повышенных выбросов плазмы в начале дугового разряда. Применение полого катода позволило уменьшить плотность тока на катоде и эрозию катода. Длина полости 20 мм является максимальной, при которой работает вся поверхность катода. Длительность импульса тока дуги 100 мксек, амплитуда — до 1500 а (регулируется напряжением на линии). На рис.2 показана вольтамперная характеристика дугового разряда. Напряжение измерялось непосредственно на дуговой камере. При увеличении тока дуги от 300 а до 1000 а сопротивление дуги падает с 0,23 ом до 0,13 ом и далее остается примерно постоянным. Динамическое сопротивление дуги имеет минимум при токе дуги 800 а. Волновое сопротивление формирующей линии 1 ом, сопротивление цепи определяется в основном внутренним сопротивлением линии и контактов, поэтому изменение сопротивления дуги практически не сказывается на форме тока дуги. На рис.3 представлены осциллограммы тока дуги (а) и напряжения на ней (б).

Для получения устойчивой дуги решающее значение имеет ограничение ее стенками дуговой камеры, а также хорошая аксиальная симметрия камеры и токоподводов к ней. При использовании в качестве дуговой камеры кварцевых трубок характеристики дуги при длительной работе не остаются постоянными из-за напыления металла катода на кварц. Поэтому для ограничения дуги

применены металлические изолированные диафрагмы. В диафрагмированном металлом канале дуга не удерживается и диаметр ее увеличивается по мере приближения к аноду. Такое расширение дуги зависит от шага диафрагм. При шаге диафрагм менее 1 мм расширение дуги резко уменьшается, что можно объяснить тем, что напряжение на длине положительного столба дуги ~ 1 мм становится меньше катодного падения потенциала на диафрагмах. По сроку службы материалы диафрагм располагаются в следующей последовательности: W, Al, Cu, Fe, Ta. В окончательной конструкции были установлены диафрагмы из дюралюминия Д16Т толщиной 0,5 мм и с шагом 0,8 мм. Прикатодная диафрагма с анодной стороны была закрыта кварцевой диафрагмой толщиной 0,4 мм.

С прикатодной областью дуги связана неустойчивость типа "срыва" дугового разряда. На рис.4 представлены кривые тока дуги со срывом. Время срыва ~ 3 мксек. При срыве на дуговой камере развивается обратное напряжение до 1 кв, в результате чего происходит кратковременный сброс тока дуги (а) или ток в цепи дуги прекращается и питающая линия остается недоразряженной (б). Момент появления срыва приближается к началу импульса тока дуги до исчезновения срыва при уменьшении зазора между катодом и прикатодной диафрагмой, уменьшении длины катодной полости, повышении тока дуги и повышении плотности газа. Наиболее чувствителен срыв тока дуги к прикатодному зазору. При зазоре 0,6 мм срывы тока дуги исчезают при токе выше 400а, при зазоре 0,3 мм — при токе выше 220 а.

На интенсивность плазменной струи сильно влияет материал анода. Лучшие результаты получены с анодом из дюралюминия мар-

ки Д16. С анодами из меди и нержавеющей стали поток плазмы в 2 + 3 раза меньше. Интенсивность плазменной струи повышается с увеличением расстояния от анода до диафрагмированного канала, но увеличение этого размера свыше диаметра диафрагмы приводит к неустойчивости дуги. Вредное влияние на работу источника оказывает пар масла. При откачке вакуумной камеры источника паромасляным насосом без вымораживающей ловушки на выходной конической поверхности анода со временем появляется черный нагар, который приводит к неустойчивости плазменной струи. При вымораживании паров масла это явление не наблюдалось.

Были проведены зондовые измерения параметров плазмы источника. На рис. 5 представлены конструкции одиночного и двойного электрических зондов. Одиночный зонд использовался как цилиндрический при $l = 2,5 - 5$ мм и как сферический (точечный) при $l \sim 0,3$ мм. Зонды вводились по оси источника со стороны выхода плазмы. Экспериментальные характеристики цилиндрического зонда в плазме источника с хорошей точностью совпадают с теоретическими кривыми. Для максвелловского распределения частиц (см. рис. 6). Значения плотности по характеристикам цилиндрического и сферического зондов совпадали, а значения температуры несколько отличались. Возможно это связано с неравенством поперечной и продольной температур электронов. На рис. 7 представлены результаты измерения плотности (N_e), электронной температуры (T_e) и потенциала плазмы (φ) по оси источника при некоторых значениях тока дуги (I_d) и плотности водорода (N_H). Плотность плазмы максимальна у катода, в области дуги медленно спадает, в анодном отверстии при переходе в область струи резко снижается в несколько раз, на выходе

струи убывает экспоненциально с постоянной 0,26 см. Электронная температура примерно одинакова почти во всех областях дуги и струи. В анодном отверстии, а также после выхода струи из конических диафрагм наблюдается резкое снижение температуры в несколько раз. Плотность плазмы возрастает с увеличением тока дуги и падает с увеличением плотности водорода. Электронная температура имеет аналогичную, но более слабо выраженную зависимость от этих параметров. В анодной области дуги наблюдается максимум потенциала, который повышается до потенциала анода при уменьшении тока дуги до 200 + 250а. Возможно по этой причине при малых токах дуга не поджигается. Градиент потенциала в положительном столбе не зависит от тока дуги и составляет 25 в/см. Отрицательное падение потенциала в анодной области должно приводить к отражению значительной части протонов к анодному отверстию, что, по-видимому, играет основную роль в формировании плазменной струи. Катодное падение потенциала увеличивается с ростом тока дуги в соответствии с вольтамперной характеристикой. При токе дуги 500 а и плотности водорода в дуговой камере $\sim 3 \cdot 10^{16}$ мол/см³ плотность плазмы в струе на выходе из анода $\sim 5 \cdot 10^{17}$ 1/см³, а на выходе источника $\sim 3 \cdot 10^{13}$ 1/см³. Электронная температура 7 + 8 эв; отрицательное падение потенциала в анодной области ~ 5 в, потенциал на выходе струи относительно анода ~ -10 в, катодное падение потенциала ~ 55 в.

Используя теорию дуговой плазмы [3,4] был произведен приближенный расчет дугового разряда. При токе дуги 500а расчетная плотность плазмы в диафрагмированной области $2 \cdot 10^{15}$ /см³ температура электронов ~ 4 эв, температура ионов $\sim 0,9$ эв, градиент потенциала 30 в/см. Расчетная зависимость параметров

плазмы в столбе от тока дуги и плотности водорода качественно совпадают с экспериментальными.

При токах дуги от 400 а до 800 а по доплеровскому смещению в СВЧ диапазоне [5] была измерена скорость плазменной струи. Скорость струи практически не зависит от тока дуги и составляет $1,5 \cdot 10^6$ см/сек (энергия протонов 1,2 эв). Таким образом, при токе дуги 500 а поток плазмы из анодного отверстия имеет величину, эквивалентную ~ 30 а протонного тока, а на выходе источника ~ 2 а. По свечению экранов и непосредственно струи установлено, что плазменная струя имеет угол раствора 14° , определяемый ограничивающими коническими диафрагмами.

Отсос протонов

Отсос протонов производился через сетку на цилиндр Фарадея по схеме рис.8а. Сетка, прозрачность 80%, выполнялась из никелевой проволоки диаметром 0,1 мм. Шаг сетки был значительно меньше толщины ленгмювского слоя отсасываемых протонов. Все устройство помещалось в вакуумной камере с давлением $3 \div 5 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.

Отсасываемый протонный ток ограничивается пробоями отсасывающего промежутка. Весь плазменный поток, выходящий из дугового разряда, использовать не удалось. В описываемых экспериментах плазменная струя была ограничена диафрагмами, как это показано на рис.1, в результате чего ее интенсивность была снижена на порядок. На электрическую прочность отсасывающего промежутка основное влияние оказывает, по-видимому, величина потока нейтрального водорода в струе, хотя с повышением плотности водорода в дуговой камере вероятность пробоя увеличивалась незначительно. Ограничивающие струю конические диафрагмы с дифференциальной откачкой газа позволяют значительно снизить поток газа на отсасывающий электрод. Наилучшие результаты по отсосу протонов получены, когда отверстия в диафрагмах и отверстие в аноде лежат на конической поверхности. Для повы-

шения электрической прочности необходимо применять отсасывающий электрод хорошо обтекаемой формы. При отсосе ионов на плоскую полированную пластину вероятность пробоя значительно выше по сравнению с отсосом на сетку с хорошей прозрачностью. Уменьшение диаметра обоймы сетки приводит к уменьшению электрической прочности. При работе с хорошо обезгаженной сеткой пробой, как правило, происходит между обоймой сетки и плазмой. Вероятность пробоя зависит от зазора между источником плазмы и отсасывающей сеткой и имеет минимум при величине этого зазора в $2 \div 4$ мм. С увеличением отсасывающего напряжения до $2 \div 3$ кв вероятность пробоя достаточно быстро возрастает, при дальнейшем увеличении напряжения до $10 \div 15$ кв вероятность пробоя практически остается постоянной.

На рис.9 представлена зависимость тока отсасываемых ионов на цилиндр Фарадея в зависимости от тока дуги. Практически для выхода ионов имеется порог при токе дуги 200 а. Далее ионный ток растет линейно с током дуги. При постоянном токе дуги ионный ток не зависит от напряжения отсоса (в диапазоне $3 \div 15$ кв). Ионный ток также практически не зависит и от плотности водорода в дуговой камере. Диаметр пучка вытягиваемых ионов, определенный по следу на сетке равен 6 мм. Максимальный достигнутый ионный ток через сетку без пробоев 1 а, с 10% пробоев - 1,5 а (плотность тока на сетку - 6 а/см^2). Анализ пучка за отсасывающей сеткой показал, что содержание молекулярных ионов водорода менее 5%. На рис.10а показана осциллограмма ионного тока, которая находится в хорошем согласии с формой импульса тока дуги и подтверждает хорошую стабильность плазменной струи. После $\sim 10^5$ импульсов ухудшение формы и уменьшение амплитуды ионного тока не наблюдалось. Более длительные испытания не производились.

Получение пучка отрицательных ионов водорода

Для получения пучка отрицательных ионов водорода за сеткой, отсасывающей протоны, была установлена трехсекционная перезаряд-

ная трубка длиной 150 мм и диаметром 12 мм (см. рис.86). В этом случае использовалась сетка прозрачностью 70% из никелевой проволоки диаметром 0,05 мм. Струя водорода, выходящая из источника плазмы, заполняет трубку с примерно постоянной плотностью. При повышенной плотности водорода в дуговой камере толщина водорода в трубке достигала величины $\sim 10^{15}$ мол/см². При необходимости мог производиться дополнительный напуск водорода в перезарядную трубку. Пучок отрицательных ионов водорода, выходящий из перезарядной трубки, пропусклся через магнитный анализатор и измерялся цилиндром Фарадея. Общая длина ионного тракта 90 см. Ток положительных ионов, поступавших в перезарядную трубку, определялся по току с трубки. При этом выход трубки закрывался заглушкой, а на отсасывающую сетку подавался отрицательный потенциал до 500 в. На рис.11 представлены зависимости тока H^- после анализатора от тока положительных ионов в трубку при различных напряжениях отсоса ионов. При малых ионных токах выход H^- составляет от 1% до 1,5%, однако при дальнейшем росте тока положительных ионов выход H^- начинает падать. Максимум тока H^- сдвигается в сторону больших токов положительных ионов при увеличении напряжения отсоса. При подаче положительного потенциала на трубку ток H^- уменьшается, при отрицательном потенциале на трубке наблюдается некоторое увеличение выхода H^- , максимальное при $U_m = -200+250$ в. Максимальный полученный нами ток отрицательных ионов водорода 3,15 ма при энергии 12 кэв. При энергии 15 кэв удавалось получить ток H^- до 4,5 ма. На рис.96 показана форма импульса тока H^- . На рис.12 - распределение тока H^- по сечению пучка после анализатора. Распределение тока определялось с помощью диафрагм и светящихся экранов. Измеренный угловой растрор пучка $\sim 0,015$ радиана.

Из приведенных результатов экспериментов можно заключить, что при больших ионных токах, имеет место расфокусировка ионного пучка пространственным зарядом в отсасывающем зазоре, а перезарядная трубка пропускает пучок с очень малым угловым отклонением периферийных ионов. За счет ионизации водорода в перезарядной трубке, по-видимому, имеет место хорошая компенсация пространственного заряда.

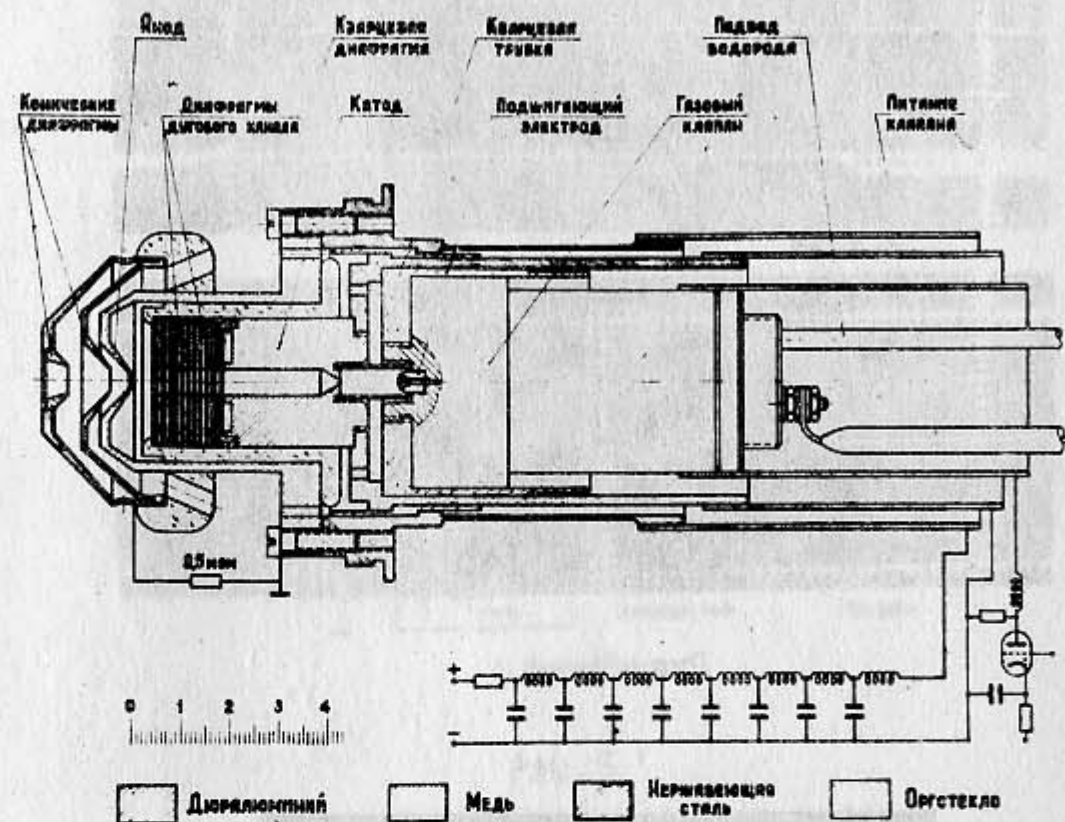


Рис.1

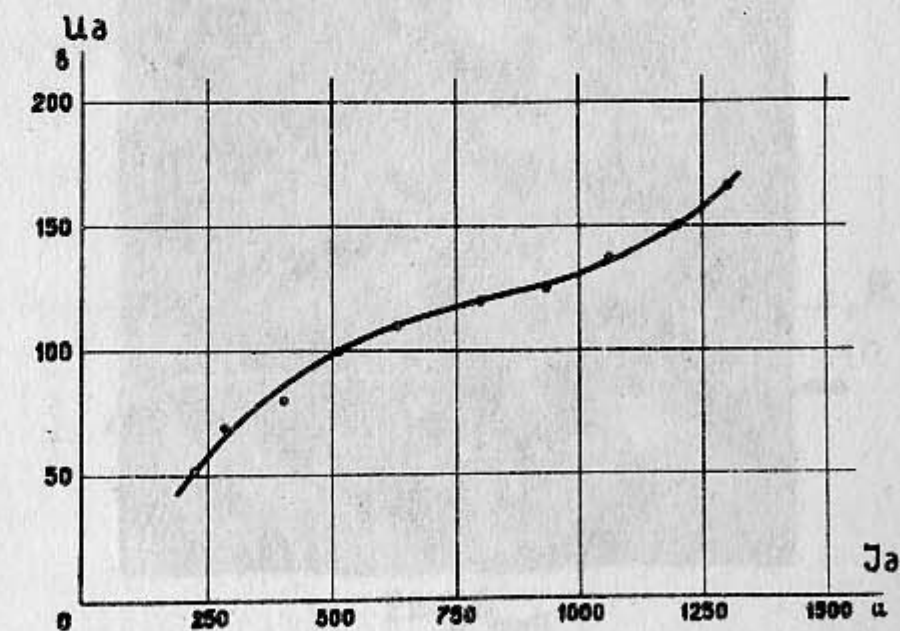


Рис.2

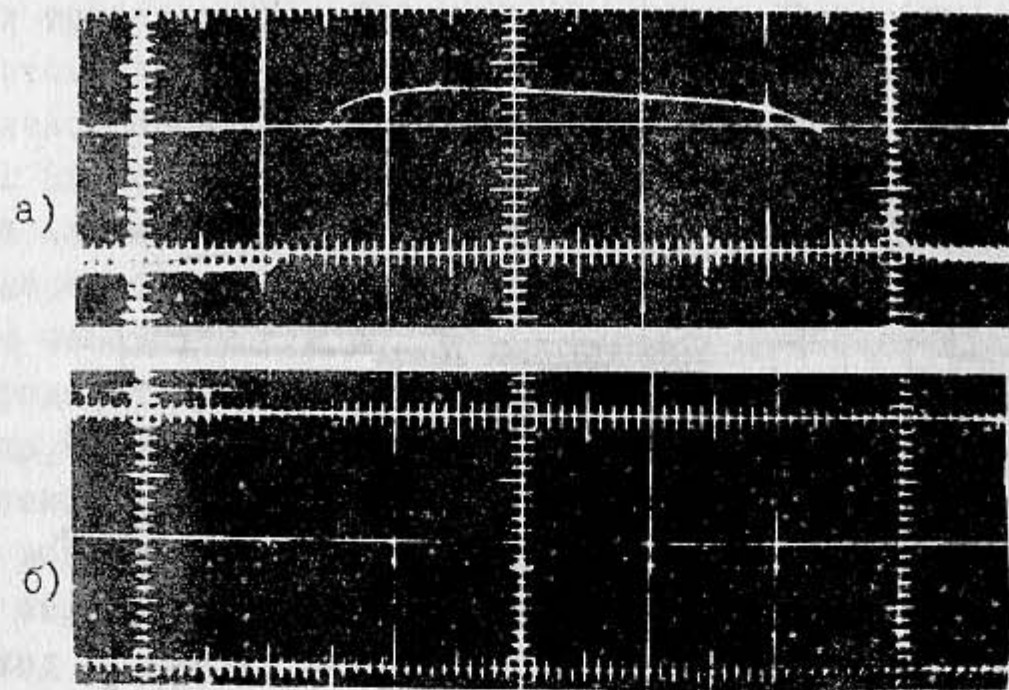


Рис. 3

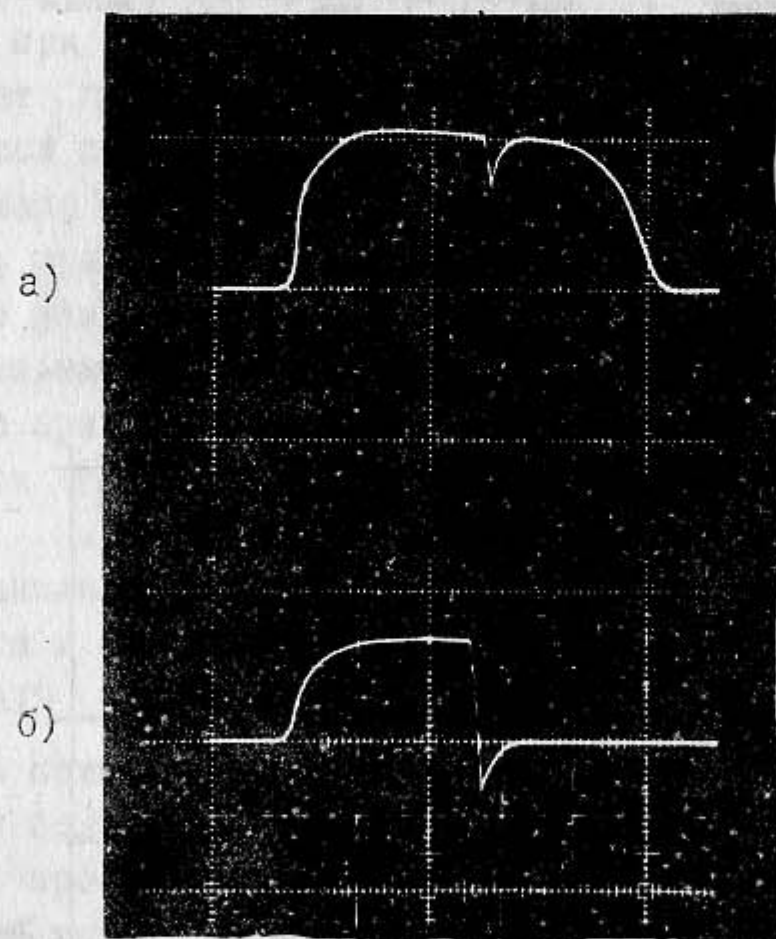


Рис. 4

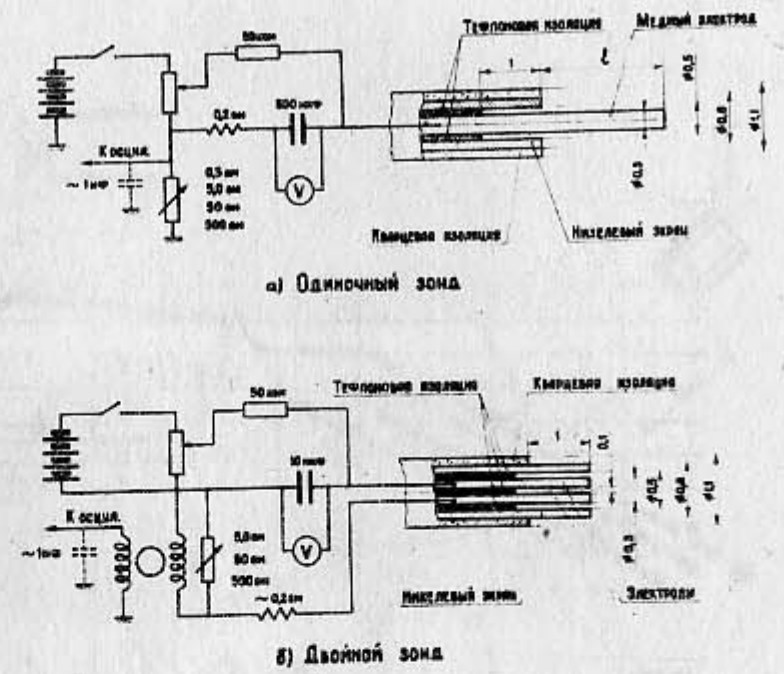


Рис. 5

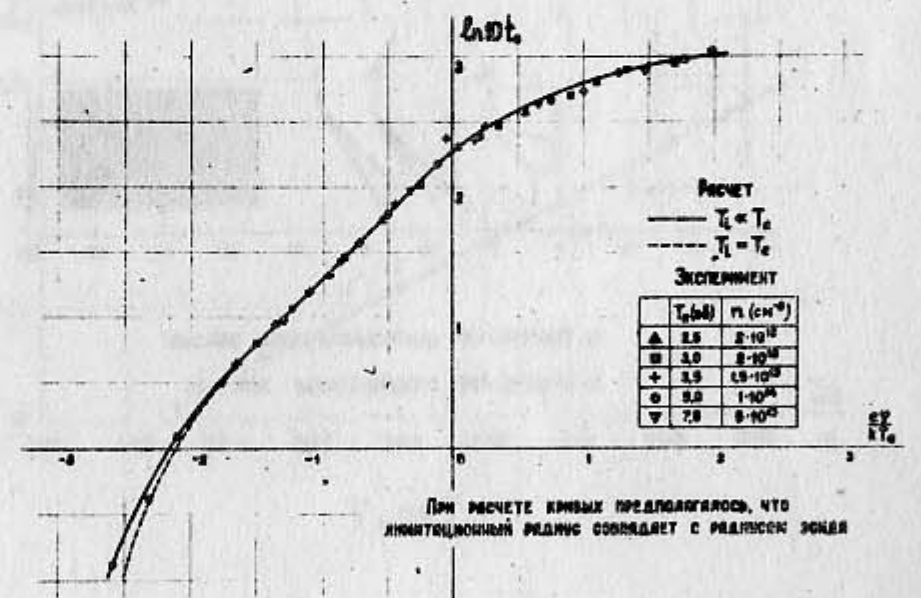


Рис. 6

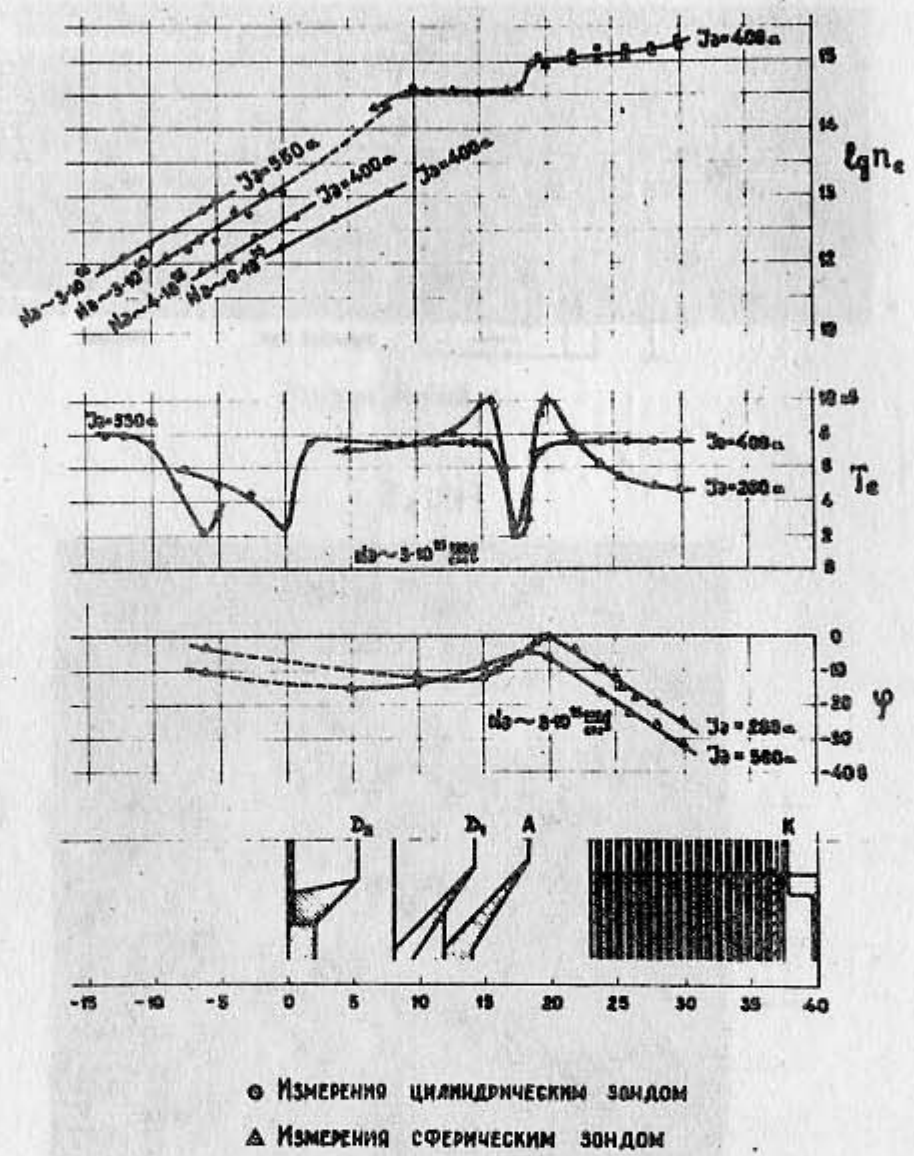


Рис. 7

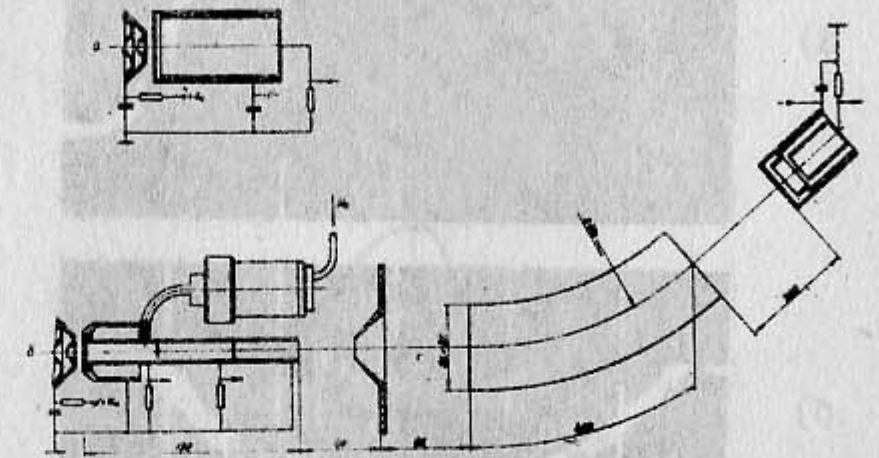


Рис. 8

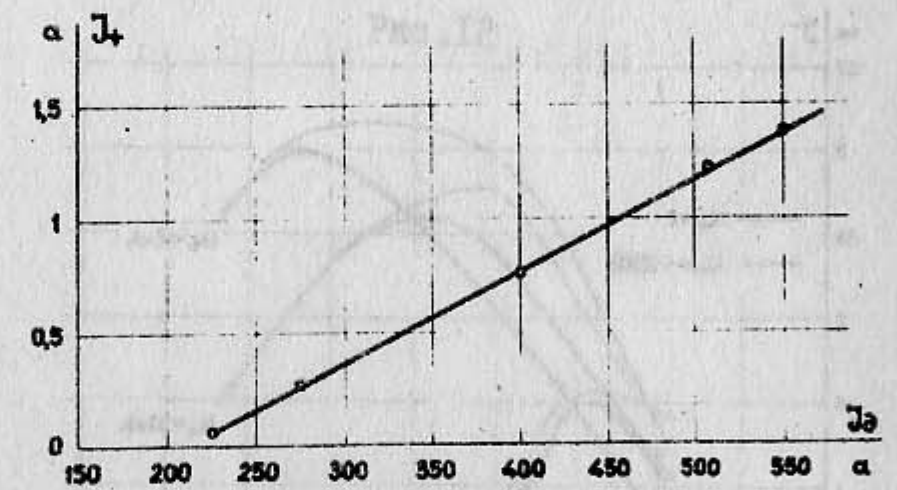


Рис. 9

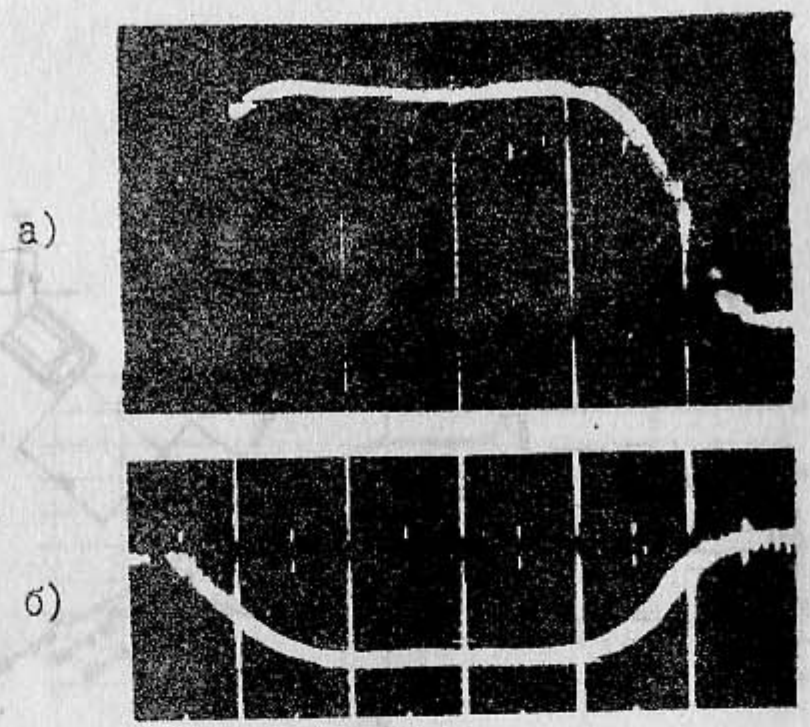


Рис. I0

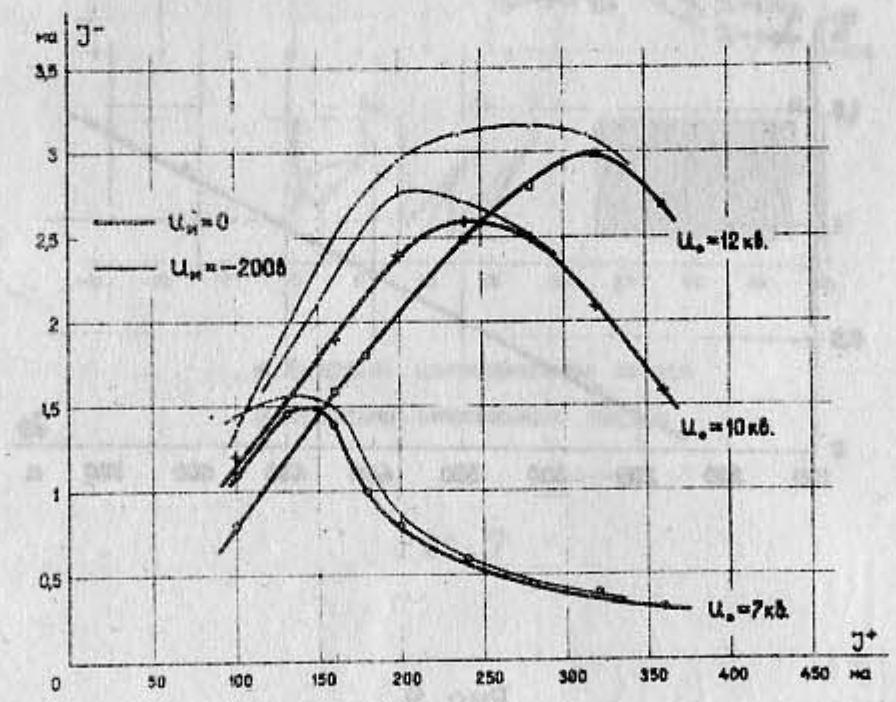


Рис. II

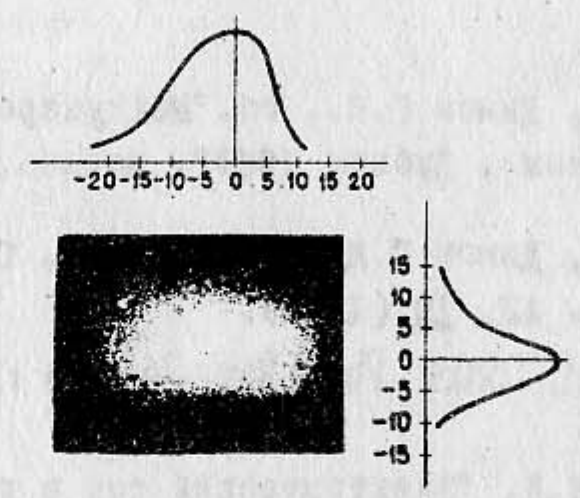


Рис. I2

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность механику Журавлеву П.А., изготовлявшему ионные источники и зонды.

Л и т е р а т у р а

1. Будкер Г.И., Димов Г.И., сб. "Международная конференция по ускорителям ; Дубна, 1963". Москва, 993 (1964).
2. Будкер Г.И., Димов Г.И., Попов А.Г., Свиридов Ю.К., Сухина Б.Н. Тимошин И.Я. АЭ, 19 (1965).
3. I. Langmuir, L. Tonks. Phys. Rev, 34, 874 (1926).
4. Грановский В.Л. "Электрический ток в газе". т. I, М.-Л., Гостехтеориздат (1952).
5. Р.Х.Куртмуллаев, Д.Е.Нестерихин, А.Г.Пономаренко, ЖТФ, 34, 189 (1964).
6. W.A.S. Lamb, E.J. Lofgren, Rev. Sci. Inst. 27, 11, 907 (1956).
7. N.B. Brooks, P.H. Rose, A.B. Wittkower, R.P. Bastick, Nucl. Instrum. and Methods, 28, 315 (1964).