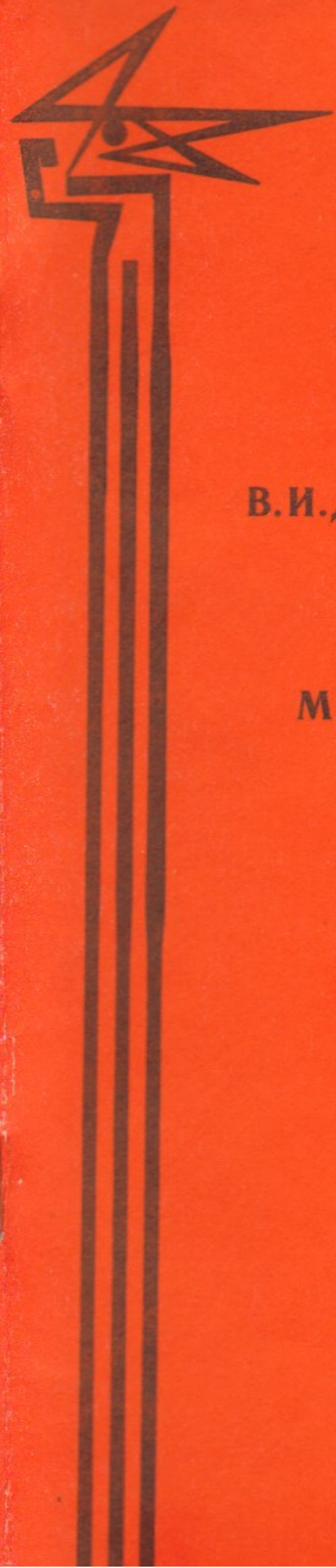


39

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
СО АН СССР



В.И.Давыденко, Г.И.Димов, И.И.Морозов,  
Г.В.Росляков

**МНОГОАМПЕРНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ  
ИСТОЧНИК ПРОТОНОВ**

*ПРЕПРИНТ 82-49*



Новосибирск

## МНОГОАМПЕРНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ПРОТОНОВ

В.И. Давыденко, Г.И. Димов, И.И. Морозов, Г.В. Росляков

### А Н Н О Т А Ц И Я

Описана конструкция импульсного протонного источника. Источник формирует пучок вытягиванием ионов из плазменного эмиттера с содержанием протонов более 95%. Получены пучки с током более 30 А и энергией 25 кэВ длительностью импульса 200 мксек, с частотой следования импульсов 0,2 Гц. Эмиссионный диаметр пучка 9 см, угловая расходимость  $10^{-2}$  рад  $\times$   $2 \cdot 10^{-2}$  рад.

Для накопления затравочной плазмы из высокоэнергетичных протонов и подогрева мишенной плазмы в сооружаемой амбиполярной плазменной ловушке "АМБАЛ" /1/, необходимы импульсные атомарные пучки. Пучки атомов водорода с эквивалентными токами  $\sim 50$  А, энергией  $\sim 20$  кэВ и длительностью 200 мксек будут получены перезарядкой протонных пучков в сверхзвуковой струе из паров магния /2/. Нами разработан и испытан опытный источник протонов для стартовых атомарных инжекторов установки "АМБАЛ" с током пучка до 37 А.

Конструкция исследованного протонного источника схематически показана на рис.1. Источник состоит из трех основных узлов: генератора плазмы, создающего высокоионизированную струю водородной (протонной) плазмы; магнитной стенки, формирующей из струи однородный плазменный поток; 4-х электродной ионнооптической системы вытягивания ионного пучка. Плазма создается в импульсном дуговом разряде с холодным катодом в водороде. Конструкция генератора плазмы аналогична описанной в /3/. Катодом разряда -I на рис.1 служит цилиндр из дюралюминия с выемкой  $\phi 10$  мм и глубиной 2,5 мм с отверстием на оси  $\phi 3$  мм. Наружный и внутренний края выемки опрессованы молибденовыми кольцами, ограничивающими область горения разряда на катоде поверхностью выемки. После импульсного - 300 мксек напуска газа в разрядную камеру электромагнитным клапаном 2 и подачи высоковольтного поджигающего импульса (-5 кВ, 5 мксек) на электрод 3 между ним и катодом происходит пробой газа. Часть плазмы, образовавшейся в результате пробоя проникает через отверстие в катоде в разрядный канал и инициирует там дуговой разряд. Разрядный канал 4 образован медными шайбами с наружным диаметром 26 мм, вставленными в цилиндрический керамический изолятор и изолированными друг от друга кольцевыми керамическими прокладками. Диаметр отверстий в шайбах - 10 мм, толщина - 0,5 мм, толщина прокладок - 1-2 мм. Длина диафрагмированной части разрядного канала 30 мм, расстояние от ближайшей к аноду шайбы до анода 10-11 мм. Анодный электрод 5 из нержавеющей стали имеет вид стакана, соосного с разрядным каналом. Торец электрода 5 толщиной 1 мм с отверстием  $\phi 8$  мм для вылета плазмы является собственно анодом, а цилиндрическая часть служит коаксиальным токоподводом. Плазма, образующаяся при горении дугового разряда в прианодной области, вы-

текает через отверстие в аноде и далее свободно расширяется в вакуум. Для увеличения выхода плазмы генератор помещен в магнитное поле соленоида 6. Экран 7 из стали армо экранирует от магнитного поля область расширения плазменной струи. Расход газа за импульс  $6 \cdot 10^{17}$  молекул, длительность разряда 200 мксек, ток разряда до 800 А, напряжение горения разряда в широком диапазоне изменения тока 60–70 В, магнитное поле соленоида до 1кЭ.

Распределение плотности потока плазмы при свободном расширении плазмы в вакуум, измеренное многосеточным зондом в плоскости, перпендикулярной оси генератора, отстоящей от анодного отверстия на расстоянии  $z = 8$  см, приведено на рис.2 кривая 2. При  $z$  много больших диаметра отверстия в аноде распределение достаточно хорошо аппроксимируется зависимостью

$$j(x, z) = \frac{I}{\pi z^2 \left(1 + \frac{x^2}{z^2}\right)^2}$$

соответствующей бесстолкновительному истечению газа из малого отверстия, где  $I$  — полный поток ионов,  $x$  — расстояние от оси струи. На рис.3 приведена зависимость полного потока плазмы от величин тока разряда и магнитного поля в разряде. Для сравнения приведена величина потока плазмы при токе разряда 650 А из генератора без соленоида и экрана. В устойчивом режиме разряда во внешнем магнитном поле полный выход плазмы из анодного отверстия увеличивается более, чем в 3 раза по сравнению с разрядом без магнитного поля. Неустойчивость возникала при превышении критического значения магнитного поля, зависящего от тока разряда, и проявлялась в резком уменьшении выходящего потока плазмы и появлении в нем нерегулярных флуктуаций с частотами 0,1–10 МГц. Наблюдавшаяся величина критического магнитного поля и ее зависимость от тока и ряда других параметров разряда характерны для токовоконвективной неустойчивости /4/. Хотя, если следовать выводам работы /5/ в наших условиях длина разрядного канала недостаточна для развития этой неустойчивости.

Для формирования ионного пучка неоднородность плотности эмиссии протонов не должна превосходить  $\pm 10\%$  /6/. Вследствие сильной неоднородности струи плазмы, выходящей из генератора, для формирования пучка может быть использовано только 10% от полного потока плазмы. Для более полного использования генери-

руемой плазмы служит магнитное поле, возбуждаемое импульсным током в прозрачной тороидальной обмотке (8 на рис.1) — "магнитной стенке". Магнитное поле стенки отражает периферийную часть плазменной струи и тем самым значительно повышает однородность плазменного потока на выходе магнитной стенки — кривая 1 на рис.2. При этом в однородной части эмиттера сосредоточено свыше 50% полного потока плазмы генератора. В результате экспериментальных исследований нескольких вариантов обмоток, отличавшихся формой и направлением токов в витках, был выбран следующий: тороидальная обмотка состоит из 16 равномерно размещенных по азимуту витков изолированного медного провода  $\varnothing 2,5$  мм, имеющих форму трапеции. Высота обмотки 10 см, внешний диаметр 15 см, внутренние большой (на выходе плазменного потока) и малый (на входе) диаметры 10 и 6 см соответственно. Величина тока в обмотке 0,5–1 кА, азимутальное магнитное поле в торе при этом составляло 300–600 Э. Отражение плазменного потока локализованным магнитным полем изучалось в эксперименте, схема которого приведена на рис.4. Струя плазмы из генератора 1 проходила через плоскую "прозрачную" соленоидальную обмотку с регулируемым током 2. Обмотка отстояла от генератора на расстоянии 10 см, при этом плотность потока плазмы составляла около 1 А/см<sup>2</sup> и была близка к величине плотности потока на магнитную стенку. Зонды 3, измеряли поток ионов плазмы, прошедший сквозь магнитное поле обмотки. На рис.5 приведены зависимости токов на зонды от магнитного поля, величина которого приведена в единицах отношения ширины обмотки соленоида  $d$  к ларморовскому радиусу  $\rho_i$  иона с энергией 10 эВ. Кривые 1, 2, 3 соответствуют углу падения плазменного потока  $\alpha = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  по отношению к плоскости обмотки соленоида, при этом во всех трех случаях скорость невозмущенного потока перпендикулярна направлению магнитного поля. Как видно из рисунка отражение основной части плазменного потока определяется движением ионов плазмы в магнитном поле. В зависимости от угла падения отражение происходит при величине магнитного поля достаточной для поворота иона с энергией  $\sim 10$  эВ внутри соленоида на дополнительный угол  $2 \cdot (\pi - \alpha)$ . Электроны при этом свободно проникают в область с магнитным полем на расстояние порядка ионного ларморовского радиуса. В пользу описанной модели отражения плазменной струи свидетельствует ряд экспериментальных фактов. Величина энергии ионов, оцениваемая по

магнитному полю в 5–10 эВ близка к определенной датчиком скоростей ионов /7/. Относительное ослабление плазменного потока при изменении ширины соленоида зависит лишь от отношения  $d/\rho_i$ . Кривые ослабления потоков дейтериевой и водородной плазмы полностью совпадают. Немонотонность кривой 2 на рис.5 связана с поворотом потока ионов в магнитном поле соленоида.

Формирование протонного пучка вытягиванием ионов из эмиттирующей плазмы осуществляется многощелевой четырехэлектродной ионно-оптической системой, результаты исследования которой подробно описаны в /6/. Ионно-оптическая система состоит из четырех электродов, укрепленных на кольцевом изоляторе из оргстекла. В электроды вставлены кольца из нержавеющей стали, на торцы которых приварены точечной сваркой молибденовые нити 0,25мм с шагом 1 мм, образующие многощелевую поверхность – "сетку". Первая сетка, ближайшая к плазме – плавающая, ее потенциал при работе генератора плазмы близок к потенциалу анода  $+U$ . Вторая сетка – фокусирующая, она отстоит от первой на расстоянии 1 мм и имеет потенциал  $+0,93U$ . Третья сетка – ускоряющая, находится на расстоянии 3,5 мм от фокусирующей и имеет потенциал  $-0,03U$ . Небольшой отрицательный потенциал третьей сетки предотвращает попадание вторичных электронов, компенсирующих объемный заряд пучка, в ускоряющий промежуток. Четвертый заземленный электрод в отличие от описанного в /6/ не имеет нитей, при этом роль четвертой сетки выполняет вторичная плазма, генерируемая пучком в вакуумной камере. Сетки изготовлены и выставлены таким образом, что и нити находятся друг против друга с точностью  $\pm 0,02$  мм. Диаметр сформированного пучка определяется размерами однородной части плазменного эмиттера и задается отверстием в кольце плазменной сетки с диаметром 90 мм. Вытягивающее напряжение подается на анод генератора плазмы от высоковольтного импульсного модулятора /8/. Модулятор формирует импульсы прямоугольного стабилизированного с точностью  $\pm 3\%$  напряжения с регулируемой амплитудой 5–25 кВ и длительностью 250 мксек. Вторая сетка питается от омического делителя с полным сопротивлением 1,2 кОм, подключенного к выходу модулятора. Третья сетка подключена к низковольтному выпрямителю. Для предотвращения разрушения при пробоях схемы питания сеток оборудованы электронными системами защиты, полностью выключающими напряжения за время  $\leq 5$  мксек после начала пробоя.

Полученный из источника ток ионов в условиях оптимального формирования пучка /6/ следовал зависимости  $U^{3/2}$  и составил 37 А при энергии ионов 25 кэВ. В результате проведенного масс-спектрометрического анализа установлено, что доля протонов в пучке составляет 95%, остальная часть пучка состоит из ионов  $H_2^+$  – 2%,  $H_3^+$  – 1% и ионов с массами 12–40 – 20%. Тяжелые ионы, по-видимому, возникают в эмиттирующей плазме вследствие ионизации и перезарядки молекул газа, адсорбированных на плазменной сетке и деталях магнитной стенки и сбитах плазменной струей.

В использованной системе формирования пучка основной вклад в расходимость пучка должны вносить поперечные скорости ионов в плазменном эмиттере. По измерениям локальной расходимости пучка была определена поперечная температура протонов эмиттера, составившая 3 эВ. Эта величина хорошо согласуется с измерениями, проведенными датчиком поперечных скоростей /7/. В периферийной области пучка в 1,5 см от края ионы имеют направленную по радиусу регулярную скорость, соответствующую поперечной энергии 0,15эВ. Расчетные распределения плотности тока в пучке на расстоянии 150 см от источника с учетом начальных скоростей ионов приведены на рис.6. Кривая 1 на рис.6 соответствует направлению вдоль нитей сеток, а кривая 2 – поперек. Экспериментальные значения приведены на рисунке точками. Измерения проводились с использованием токовых и калориметрических датчиков плотности тока пучка. Повышенная расходимость пучка в направлении поперек нитей сеток, в основном, обусловлена увеличением поперечных скоростей ионов из-за сжатия пучка в элементарной ячейке в 2 раза и не связана с абберациями ионно-оптической системы.

Как видно из рис.6 наблюдаемая в опытах расходимость пучка превосходит расчетную, учитывающую лишь начальные поперечные скорости ионов. Экспериментально установлено, что пучок состоит на 85% из ионов и на 15% из атомов. Атомы имеют полную энергию и возникают из первичного пучка в результате перезарядки протонов в облачке водорода вблизи вытягивающей сетки. Давление остаточных газов в вакуумной камере составляет  $2 \cdot 10^{-6}$  торр, поэтому вклад перезарядных столкновений на длине пролета 150 см на порядок меньше. Распределение плотности потока атомов совпало с расчетным, представленным на рис.6 кривыми 1 и 2. Отличие в распределениях интенсивности атомарной и ионной компонент пучка очеви-

дно связано с действием нескомпенсированной части объемного разряда ионов. Нами были проведены измерения пространственного распределения потенциала в пучке. Потенциал определялся по максимуму первой производной тока термоэмиссионного зонда /9/. На рис.7 приведено радиальное распределение потенциала и относительной плотности ионного тока в пучке с током 25 А и энергией 20кэВ, измеренное на расстоянии 25 см от источника через 50 мксек после начала импульса. Аналогичные зависимости были определены в сечениях пучка, отстоящих на разных расстояниях от источника. Максимальное значение потенциала на оси пучка слабо падает с увеличением расстояния от источника от 14 В (9 см) до 11 В (70см). С учетом определенных электрических полей в пучке рассчитанное распределение плотности тока - кривые 3 и 4 на рис.6, хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Исследованный источник работал с частотой 0,2 Гц, определяемой параметрами системы питания. Частота следования импульсов с более мощной системой питания может быть увеличена на порядок без изменений в конструкции источника. Срок службы источника определяется эрозией катода генератора плазмы и превосходит  $10^5$  импульсов без смены катода. Интегральная газовая эффективность источника при токе пучка 37 А близка к 5%. Полная энергия в пучке за импульс - до 200 Дж. На основании описанных выше исследований разработан протонный источник "СТАРТ-2" с током пучка до 80 А для инжекторов установки "АМБАЛ". В настоящее время завершаются испытания этого источника.

Авторы выражают благодарность П.А. Журавлеву и В.А.Новикову за помощь в изготовлении и эксплуатации источника, В.Я.Савкину - за разработку основных схем питания.

## Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Димов. Препринт ИЯФ СО АН СССР 77-46, Новосибирск (1977).
2. В.Г.Соколов, И.Я.Тимошин. ЖТФ, 52, 283 (1982).
3. Г.И.Димов, Г.В.Росляков. ПТЭ № 1, 29 (1974).
4. В.В.Кадомтсев, А.В.Недоспасов. J.Nucl.Energy C1, 230 (1960).
5. А.В.Тимофеев. ЖТФ, 31, 1420 (1961).
6. В.И.Лавыденко, Г.В.Росляков, Н.Г.Хавин. ПТЭ, № 5, 21 (1981).
7. Г.В.Росляков. ПТЭ, № 2, 167 (1981).
8. В.Я.Савкин. ПТЭ, № 3, 115 (1981).
9. Смит, Гершкович, Коукли. ПНИ, № 2, 73 (1979).

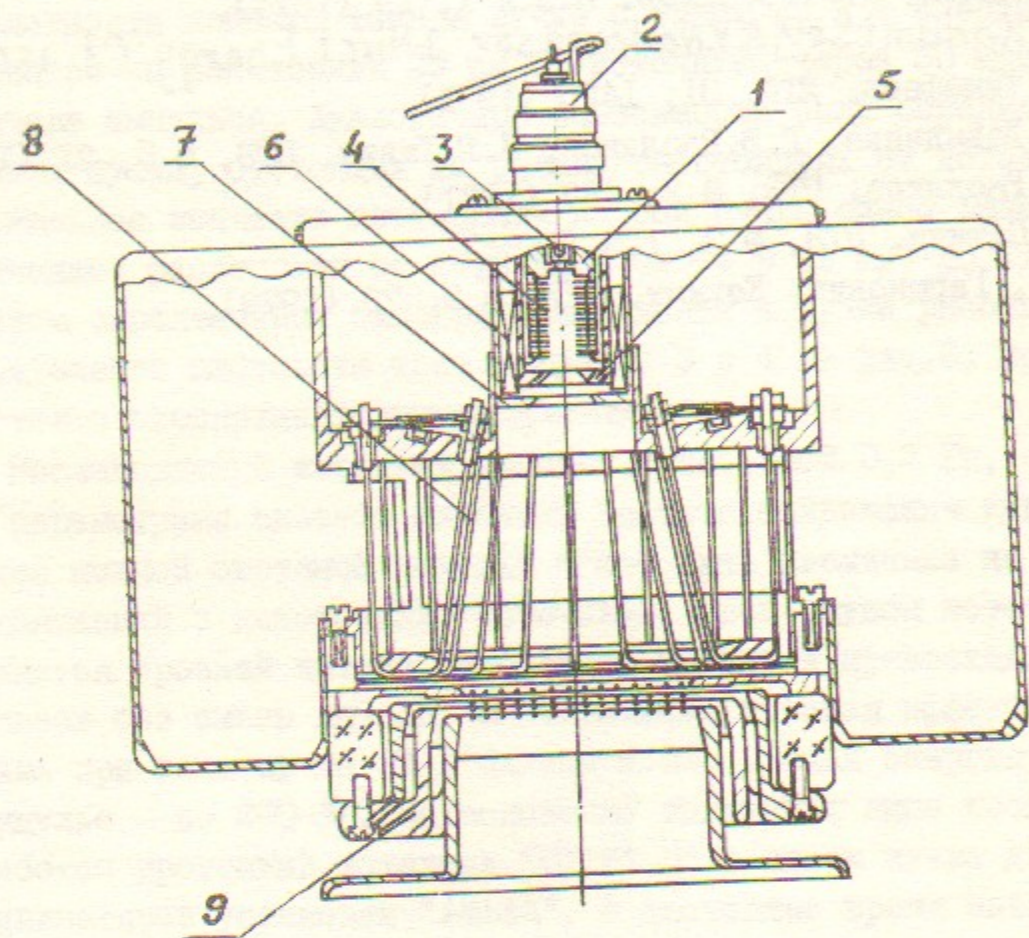


Рис.1. Схема источника. 1 - катод; 2 - газовый клапан; 3 - поджигающий электрод; 4 - разрядный канал; 5 - анод; 6 - соленоид; 7 - магнитный экран; 8 - "магнитная стенка"; 9 - ионно-оптическая система.

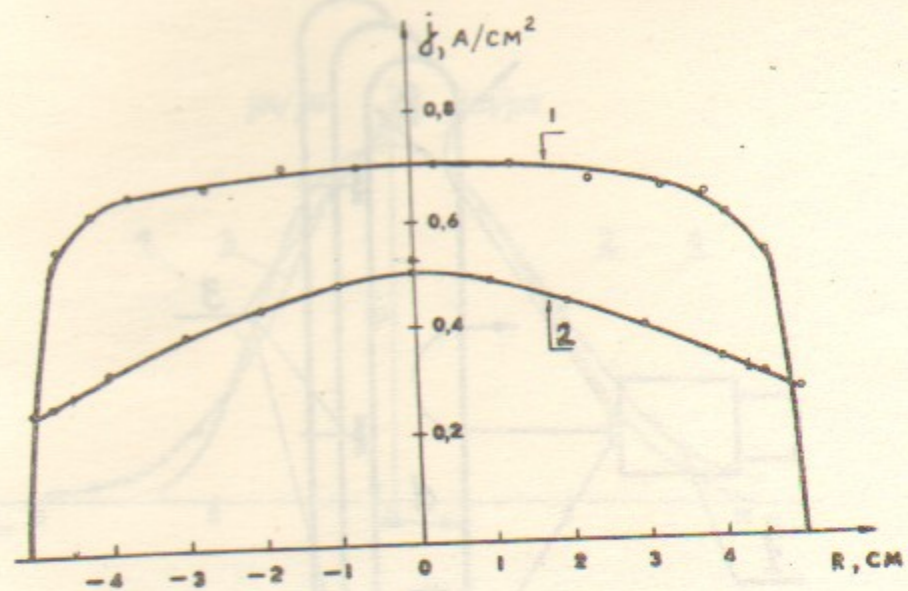


Рис.2. Распределение плотности тока ионной эмиссии плазмы. 1 - эмиттер с магнитной стенкой; 2 - без магнитной стенки.

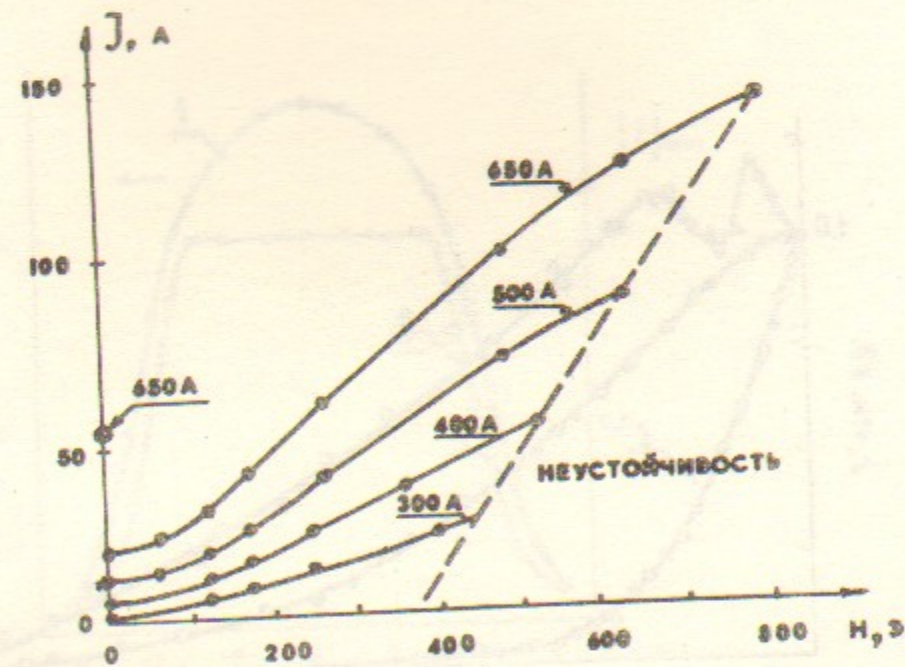


Рис.3. Зависимость потока плазмы из генератора от тока разряда.

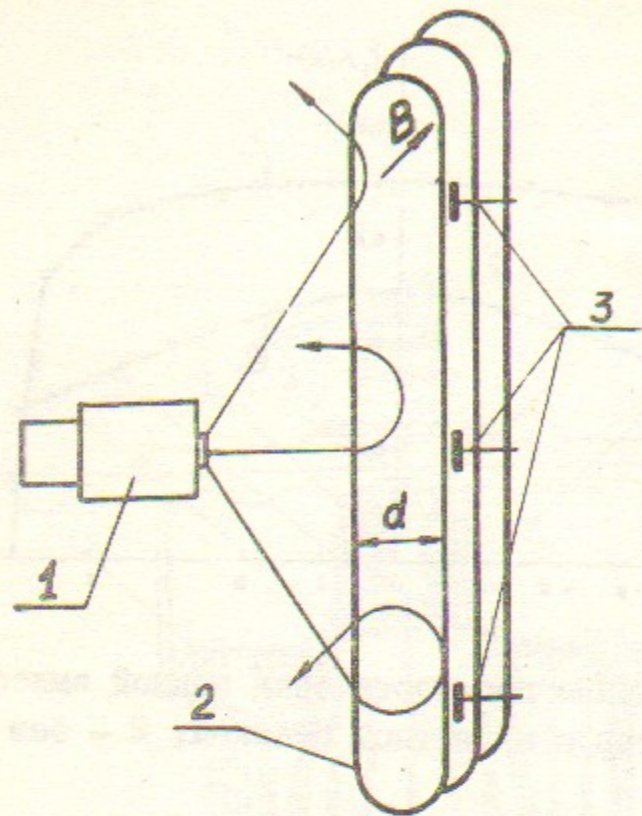


Рис.4. Схема эксперимента по отражению плазмы магнитным полем.

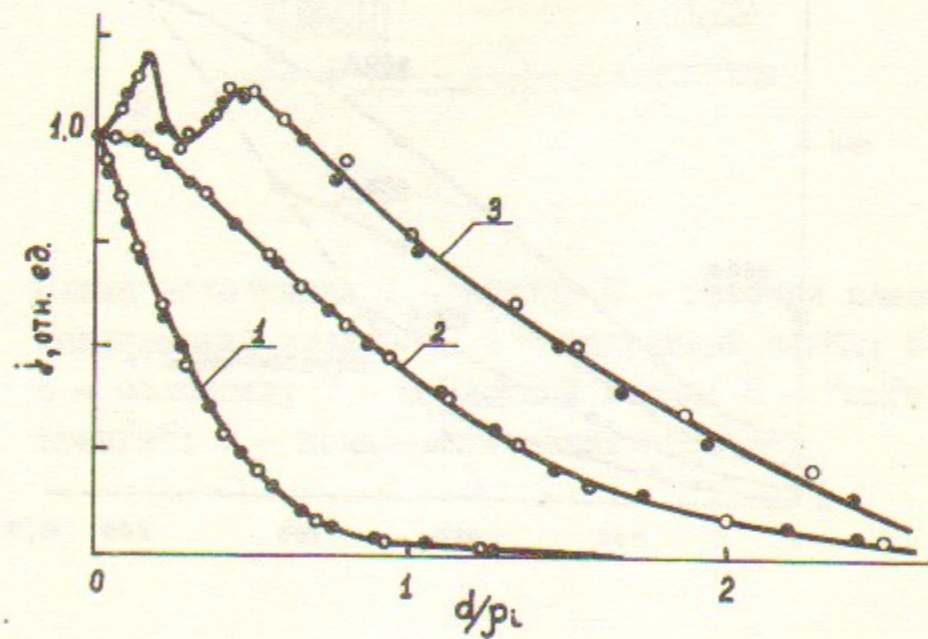


Рис.5. Зависимость потока плазмы на зонды от магнитного поля. 1 -  $135^\circ$ ; 2 -  $90^\circ$ ; 3 -  $45^\circ$ ; ● - протоны; ○ - дейтоны.

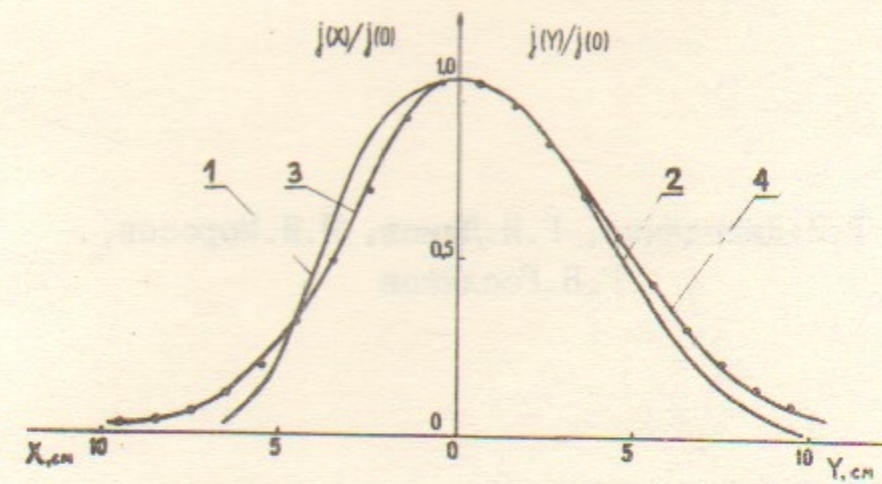


Рис.6. Распределения плотности тока в пучке.

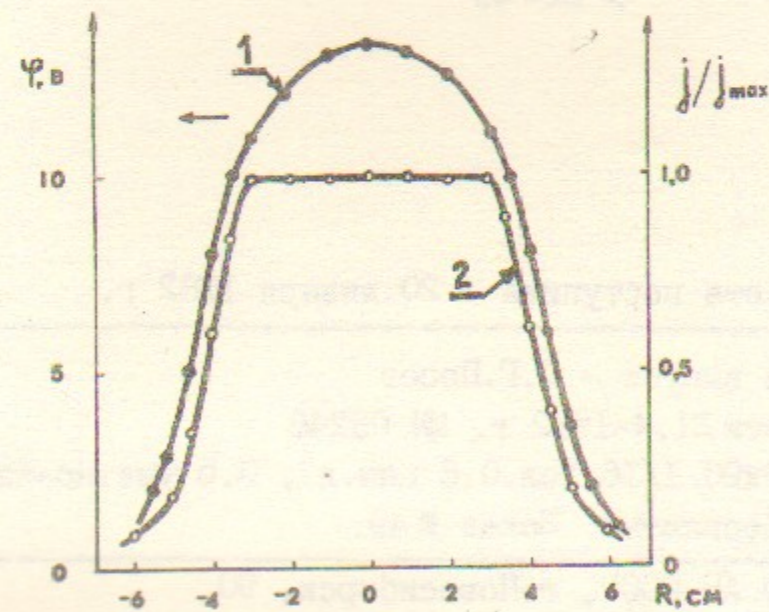


Рис.7. Распределения потенциала в пучке - 1 и плотности тока в пучке - 2.



В.И.Давыденко, Г.И.Димов, И.И.Морозов,  
Г.В.Росляков

МНОГОАМПЕРНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК  
ПРОТОНОВ

Препринт

№ 82-49

Работа поступила - 20 января 1982 г.

---

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 21.4-1982 г. МН 03246

Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.0,6 печ.л., 0,5 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 49.

---

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90