

физика плазмы

37

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

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

**ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ИНЖЕКТОР
АТОМОВ ВОДОРОДА**

ПРЕПРИНТ 80-118



Новосибирск

Работа поступила - 4 января 1980 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ
Подписано к печати 21.04.1980 г. МН 06759
Усл. 1,0 печ.л., 0,9 учетно-изд.л.
Тираж 200 экз. Бесплатно.
Заказ № 118

Отпечатано на ротапинтере ИЯФ СО АН СССР

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ИНЖЕКТОР АТОМОВ ВОДОРОДА

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

А Н Н О Т А Ц И Я

Для применений в активной корпускулярной диагностике плазмы разработан импульсный перезарядный инжектор атомов изотопов водорода. Длительность импульса тока 10 ± 200 мксек, эквивалентный ток атомов H^0 до 3,5 А, энергия атомов изменяется в диапазоне 3 - 25 кэВ. Максимум плотности тока атомов H^0 на расстоянии 1,5 м от инжектора 250 mA/cm^2 . Свыше 90% первичного ионного пучка составляют атомарные ионы. Инжектор может быть использован для получения пучков атомов He , Ne , Ar .

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ИНЖЕКТОР АТОМОВ ВОДОРОДА

Для применений методов активной корпускулярной диагностики плазмы в ведущихся исследованиях по магнитному удержанию термоядерной плазмы необходимы достаточно интенсивные и монохроматичные по энергии атомарные пучки с малой угловой расходимостью и регулируемой энергией. Так в диагностических схемах с локальной искусственной перезарядной мишенью [1-3], с рассеянием атомов пучка на ионах плазмы [3,4] в плазме с $n_e \sim 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $T_e, T_i \sim 1 \text{ кэВ}$ и диаметром $\sim 1 \text{ м}$ требуются пучки атомов изотопов водорода с энергией в десятки килоэлектровольт, с эквивалентными токами в несколько ампер, плотностью тока в центре плазменного шнура (на расстоянии 1-2 м от инжектора) $\sim 100 \text{ мА/см}^2$, угловой расходимостью $\sim 1^\circ$ и энергетическим разбросом $\leq 1-2\%$. Диагностический инжектор атомов водорода, описанный в [5,6], в основном удовлетворяет перечисленным требованиям, однако, в ряде случаев его применение ограничено из-за недостаточной проникающей способности пучка атомов в горячую плотную плазму, вследствие низкой энергии атомов $\sim 10 \text{ кэВ}$. Для увеличения глубины зондирования плазмы нами на основе инжектора, описанного в [5], разработан и исследован импульсный диагностический инжектор атомов водорода с более высокой максимальной величиной плотности потока атомов H^0 в пучке - до 250 мА/см^2 на расстоянии 1,5 м от инжектора и энергией атомов до 25 кэВ.

Конструкция инжектора в части, отличающей его от описанной в [5], схематически изображена на рис.1. Дуговой источник плазмы 2 генерирует водородную плазменную струю, которая при расширении из анодного отверстия источника в вакуум взаимодействует с магнитным полем, возбуждаемым током в "прозрачной" тороидальной обмотке 5 - "магниной стенкой". В результате отражения плазменного потока от "магнитной стенки" в плоскости плазменной сетки 6 реализуется плазменный ионный эмиттер с постоянной плотностью тока протонной эмиссии в круге

диаметром 5 см. Из части эмиттера диаметром 3 см, задаваемой диафрагмой 7, формируется протонный пучок с помощью многощелевой 4-х электродной системы вытягивания ионов. После фокусировки в импульсной цилиндрической магнитной линзе 11 большая часть ионов перезаряжается в атомы водорода в перезарядной мишени 12 и может быть далее использована для диагностических целей. Конструкция источника плазмы описана в [5,7]. Для увеличения выхода плазмы из анодного отверстия источник плазмы помещен в магнитное поле ~ 1 кЭ, возбуждаемое импульсом тока до 10 А, длительностью 0,08 сек в соленоиде 3. Экран 4 из стали армо экранирует от магнитного поля соленоида 3 область расширения плазменной струи. Введение магнитного поля в область дугового разряда позволило увеличить выход плазмы из источника более чем в 3 раза при неизменной мощности, вкладываемой в разряд. Подробное описание экспериментальных исследований по формированию ионных эмиттеров, получаемых в результате взаимодействия плазменного потока с магнитным полем, локализованным на периферии экспандерного пространства, приведено в [8]. Поэтому мы ограничимся лишь приведением конкретных параметров "магнитной стенки" и характеристик эмиттера диагностического инжектора. Обмотка 5 "магнитной стенки" состоит из 16 витков из изолированного медного провода $\varnothing 2,5$ мм, размещенных равномерно по азимуту вокруг оси источника; внутренний диаметр обмотки 6 см, внешний - 9 см. Прямоугольный импульс тока в обмотке с амплитудой 0,8 - 1 кА при длительности 250 мксек, неравномерностью плоской вершины импульса тока менее 5%, возбуждает магнитное поле внутри обмотки величиной до 800 Э. На рис.2 приведены радиальные зависимости плотности тока эмиссии протонов, измеренные трехэлектродным сеточным зондом в плоскости плазменной сетки, отстоящей на 6 см от анода источника, с включенной с током 1 кА - кривая 1 и выключенной - кривая 2 "магнитной стенкой". Из сравнения кривых на рис.2 видно, что магнитное поле "стенки" отражает плазменную струю таким образом, что в плоско-

сти вблизи торца обмотки, в круге диаметром 5 см плотность потока плазмы увеличивается более чем в 1,5 раза и неоднородность потока не превышает 5%. Изменением тока в соленоиде 3 от 0 до 10 А и тока дугового разряда от 100 до 600 А можно регулировать плотность тока эмиссии протонов от 0,01 до 1 А/см², при этом во всем диапазоне регулировки сохраняется однородность эмиттера.

Формирование протонного пучка из плазмы осуществляется многощелевой четырехэлектродной системой вытягивания ионного пучка, описанной в [9]. Распределение потенциалов на электродах системы вытягивания следующее: 1) плазменная сетка 6 имеет плавающий потенциал, который в момент попадания на нее плазмы становится близким к потенциалу анода источника плазмы, подключенного к выходу модулятора прямоугольного стабилизированного высоковольтного импульса напряжения $U_0 = 3 \pm 25$ кВ, длительностью 250 мксек; 2) управляющая сетка 8 имеет импульсный потенциал $0,93 U_0$ и выполняет роль фокусирующей линзы; 3) вытягивающая сетка 9 имеет постоянный отрицательный по отношению к заземленному дрейфовому электроду 10 равный $-0,03 U_0$, служащий для предотвращения попадания в вытягивающий промежуток вторичных электронов, возникающих в дрейфовом пространстве пучка вследствие вторичной ион-электронной эмиссии и ионизации молекул остаточного газа и перезарядной мишени. Выбор диаметра пучка в 3 см, задаваемый диафрагмой 7 из стали X18H9T толщины 0,05 мм, связан с ограниченной мощностью модулятора импульса вытягивающего напряжения. Нити всех сеток 6, 8, 9 изготовлены из никелевых проволочек $\varnothing 0,15$ мм, закрепленных электролитически осажденной медью на кольцевых медных оправках. Вытягивающая сетка отстоит от управляющей сетки на расстоянии 3,2 мм, которая в свою очередь отстоит от плазменной сетки на расстоянии 0,8 мм, шаг всех сеток 0,8 мм. Сетки изготовлены и выставлены таким образом, что их нити находятся друг против друга с точностью $\pm 0,02$ мм.

Схема питания дугового источника плазмы аналогична

описанной в [7], питание соленоида и "магнитной стенки" осуществляется от тиристорных модуляторов тока. Высоковольтный импульс вытягивающего напряжения формируется модулятором с системой импульсной стабилизации отрицательной обратной связью, обеспечивающей стабильность энергии атомов в пучке на протяжении всего рабочего импульса не хуже $\pm 0,5\%$. Модулятор помимо инжектора нагружен высоковольтным делителем с полным сопротивлением 15 кОм, с которого подается потенциал на управляющую сетку. Для предотвращения разрушения сеток при пробоях схемы модулятора вытягивающего напряжения и питания вытягивающей сетки оборудованы электронными системами защиты, обрывающими напряжения на электродах за время ~ 1 мксек после начала пробоя.

Подача рабочего газа в источник плазмы и перезарядную мишень производится импульсно быстродействующими электромагнитными клапанами, описанными в [10]. Расход водорода в источнике плазмы $\sim 3 \cdot 10^{17}$ молекул, а в перезарядной мишени $\sim 10^{17}$ молекул за импульс. Допустимый рабочий вакуум для нормальной работы инжектора не хуже 10^{-4} Торр. Частота следования импульсов определяется возможностями существующей схемы питания и составляет 0,2 Гц. Инжектор размещен в вакуумно плотном корпусе 1 инжектора [5] с $\varnothing 250$ мм и длиной 500 мм без собственной системы откачки, прифланцовываемая к исследуемой системе.

Исследование характеристик пучка из диагностического инжектора было проведено по экспериментальной схеме, описанной в [5]. Помимо полного потока атомов в пучке экспериментально определялось также распределение плотности потока атомов в пучке и зависимости этих величин от энергии. Относительное распределение плотности потока атомов в поперечном сечении пучка определялось датчиками, измеряющими ток вторичной атомно-электронной эмиссии. Абсолютное определение плотности потока атомов проводилось калориметрически с помощью теплового датчика [5]. В работе [5] было установлено, что увеличение энергетического

разброса атомов в пучке вследствие неупругих столкновений в перезарядной мишени с необходимой толщиной достаточно мало и составляет ~ 30 эВ. Нестабильность импульса вытягивающего напряжения превосходит эту величину $\sim \pm 100$ эВ при энергии 25 кэВ и фактически определяет интегральный энергетический разброс атомов в пучке. Поэтому специальные измерения энергетического спектра атомов не проводились.

Минимальная расходимость формируемых из плазмы ионных пучков с использованием многощелевых электродов достигается при оптимальной плотности тока ионной эмиссии j для данной энергии частиц пучка E : $j \sim E^{3/2}$. Экспериментально найденная энергетическая зависимость полного потока атомов в пучке, сформированного в оптимальном режиме, хорошо согласуется с ожидаемой и имеет вид $I \sim F(E) E^{3/2}$, где $F(E)$ — коэффициент конверсии протонов в атомы в равновесной перезарядной мишени согласно данным [11]. При энергии 25 кэВ полный эквивалентный ток пучка атомов водорода из инжектора составил 3,5 А. На рис.3 приведены распределения плотности потока атомов водорода с энергией 25 кэВ, измеренные в плоскости, отстоящей на 1,5 метра от среза фланца инжектора, для пучка, полученного при оптимальных условиях эмиссии. Кривая 1, соответствующая направлению, параллельному нитям сеток системы вытягивания, и кривая 2, соответствующая перпендикулярному направлению, измерены при отсутствии фокусировки первичного протонного пучка линзой 11 на рис.1. Расходимость пучка в направлении вдоль нитей сеток полностью определяется поперечной энергией ионов в плазменном эмиттере. Вклад в расходимость пучка в направлении поперек нитей сеток вносят как начальные скорости ионов в плазме, так и наличие поперечных по отношению к направлению движения пучка электрических полей в системе вытягивания, связанное с дискретной структурой сеточных электродов. Расчетная расходимость пучка, сформированного одной ячейкой 4-х электродной системы при оптимальной плотности тока про-

тонной эмиссии из плазмы с нулевой поперечной ионной температурой, для выбранных параметров сеток согласно 9 составляет $1,1 \cdot 10^{-2}$ рад. Экспериментально наблюдаемая расходимость существенно превышает расчетную величину. Это превышение связано со свойствами используемой четырехэлектродной системы вытягивания, в которой ускоренный пучок на выходе из элементарной ячейки имеет поперечный размер примерно вдвое меньший ширины эмиттирующей плоскости плазмы, а разброс поперечных скоростей, вследствие сохранения поперечного фазового объема, вдвое больший, чем у ионов плазменного эмиттера. Эффективная поперечная температура ионов в плазменном эмиттере с "магнитной стенкой" составляет 3-4 эВ [8] с учетом удвоения ее величины в системе вытягивания, результирующая расчетная расходимость в направлении перпендикулярном нитям сеток совпадает с экспериментально измеренной. Кривые 3,4 на рис.3 соответствуют распределениям интенсивности пучка атомов водорода, измеренным на расстоянии 1,5 м от инжектора в двух взаимно перпендикулярных направлениях при оптимальной фокусировке протонного пучка магнитной линзой. Максимальная плотность эквивалентного тока атомов водорода в сфокусированном пучке составляет по калориметрическим измерениям 250 mA/cm^2 .

Полный поток атомов водорода в сфокусированном пучке, имеющем размеры $5,5 \times 6,5 \text{ cm}^2$, составил 2,5 А. Уменьшенное значение измеренного полного потока атомов связано с тем, что в опытах пучок коллимировался диафрагмой $\varnothing 4 \text{ cm}$, установленной на расстоянии 95 см от инжектора, моделирующей геометрию установки, на которой будет использоваться инжектор. В неколлимированном пучке заметная доля полного потока атомов приходится на ореол, окружающий центральную часть пучка. Этот ореол возникает за счет того, что на входе в магнитную линзу пучок состоит только на 70% из протонов, а остальная часть пучка — атомы, образовавшиеся из протонного пучка при перезарядке в облачке рабочего газа источника плазмы, находящегося сразу же за вытягивающей сеткой.

В результате проведенного масспектрометрического анализа первичного ионного пучка из инжектора установлено, что доля протонов в пучке весьма высока 93%, остальная часть пучка состоит из ионов H_2^+ — 2,5%, H_3^+ — 0,5% и ионов с массами 12-40 — 4%. Основная часть неводородных ионов имеет массы 12, 16-18, 26 и, по-видимому, соответствует C^+ , O^+ , OH^+ , H_2O^+ , CO^+ . Эти ионы, по-видимому, возникают в эмиттирующей плазме вследствие ионизации и перезарядки молекул газа, находившихся на плазменной сетке и деталях "магнитной стенки" и сбитых плазменной струей. Оцениваемая доля примесных ионов в сфокусированном и коллимированном пучке составляет 1%.

Нами были проведены эксперименты по получению из инжектора пучков атомов дейтерия и инертных газов: гелия, неона и аргона. Плазма, эмиттирующая ионы необходимого сорта, создавалась дуговым разрядом в источнике плазмы, в который напускался соответствующий газ. В качестве перезарядной мишени использовался импульсно напускаемый водород. Из-за ограниченных возможностей систем питания "магнитной стенки" и линзы, эти элементы работали только в опытах с водородным, дейтериевым и гелиевым пучками, а в опытах с пучками других атомов были выключены. Вследствие этого получение пучков атомов неона и аргона велось в условиях недостаточной эмиттирующей способности и значительной 15-20% неоднородности плазменного эмиттера. Это приводило к увеличенной расходимости сформированных пучков и ограничило максимальное значение энергии при оптимальном, в смысле угловой расходимости, режиме работы инжектора. Для пучка атомов дейтерия все характеристики совпадают с приведенными для пучка атомов водорода, кроме полного тока и плотности тока, величины которых для дейтериевого пучка меньше в $\sqrt{2} F(E)/F(E/2)$ раз. В таблице 1 приведена сводка данных, характеризующих возможности использования разработанного инжектора в режиме получения пучков атомов изотопов водорода и инертных газов. Помимо максимальной энергии E_m , эквивалентного тока атомов — I_m в пучке, плотности тока — j_m , измеренной на расстоянии 1,5 м от среза фланца инжектора,

приведен состав основной части первичного ионного пучка, определяющий массовый и энергетический спектр атомарного пучка. Двухзарядные и трехзарядные ионы и соответственно полученные из них атомы имеют энергию $2E$, $3E$, их доля слабо зависит от тока дугового разряда источника плазмы и количества напускаемого в него газа.

Авторы выражают благодарность Г.И.Димову за полезные обсуждения и поддержку работы, В.Я.Савкину, В.С.Белкину, принявшим участие в разработке схем питания, П.А.Журавлеву за помощь в изготовлении инжектора.

Л и т е р а т у р а :

1. А.М.Кудрявцев, А.Ф.Сорокин. "Письма в ЖЭТФ", 18, 486, 1973.
2. В.В.Афросимов, М.П.Петров, В.А.Садовников. "Письма в ЖЭТФ", 18, 510, 1973.
3. Е.В.Александров, В.В.Афросимов, Е.Л.Березовский, А.Б.Извозчиков, А.И.Кисляков, В.И.Марасев, Е.А.Михайлов, М.П.Петров, Г.В.Росляков "Письма в ЖЭТФ", 29, 3, 1979
4. В.В.Афросимов, И.П.Гладковский, А.И.Кисляков. "Письма в ЖТФ", 3, 10, 1977.
5. Г.И.Димов, Г.В.Росляков, В.Я.Савкин. ПТЭ, № 4, 29, 1977.
6. Г.В.Росляков, В.Я.Савкин. ПТЭ, № 1, 148, 1978.
7. Г.И.Димов, Г.В.Росляков. ПТЭ, № 1, 29, 1974.
8. Г.В.Росляков. Препринт ИЯФ СО АН СССР № 80-19, Новосибирск, 1979.
9. В.И.Давыденко, Г.В.Росляков, Н.Г.Хавин. Препринт ИЯФ СО АН СССР № 80-35, Новосибирск, 1979.
10. Г.Е.Деревянкин, В.Г.Дудников, П.А.Журавлев. ПТЭ, № 5, 168, 1975.
11. S.K. Allison, Rev. Mod. Phys., 30, 1137, 1958

Подписи к рисункам:

Рис.1. Конструкция инжектора

1 - корпус; 2 - источник плазмы; 3 - соленоид;
4 - экран соленоида; 5 - обмотка "магнитной
стенки"; 6 - плазменная сетка; 7 - диафрагма;
8 - управляющая сетка; 9 - вытягивающая сетка;
10 - дрейфовый электрод; 11 - магнитная линза;
12 - перезарядная мишень.

Рис.2. Радиальные зависимости плотности тока эмиссии
протонов.

1 - "магнитная стенка" включена; 2 - выключена.

Рис.3. Распределение плотности потока атомов водорода с
энергией 25 кэВ в двух взаимно перпендикулярных
направлениях на расстоянии 1,5 м от инжектора.

1-2 - при оптимальной фокусировке; 3-4 - без
фокусировки.

Таблица 1

Газ	E_m кэВ	I_m А	j_m мА/см ²	Состав ионного пучка %
H ₂	25	3,5	250	H ⁺ - 93; H ₂ ⁺ - 2,5; H ₃ ⁺ - 0,5 примеси - 4
D ₂	25	2,9	205	He ⁺ - 95,5; He ⁺⁺ - 0,7; примеси - 3,8
He	23	2,0	90	
Ne	20	1,1	15	Ne ⁺ - 62,5; Ne ⁺⁺ - 35; приме- си - 2,5
Ar	22	0,6	12	Ar ⁺ - 27; Ar ⁺⁺ - 58; Ar ⁺⁺⁺ - 14 примеси - 1

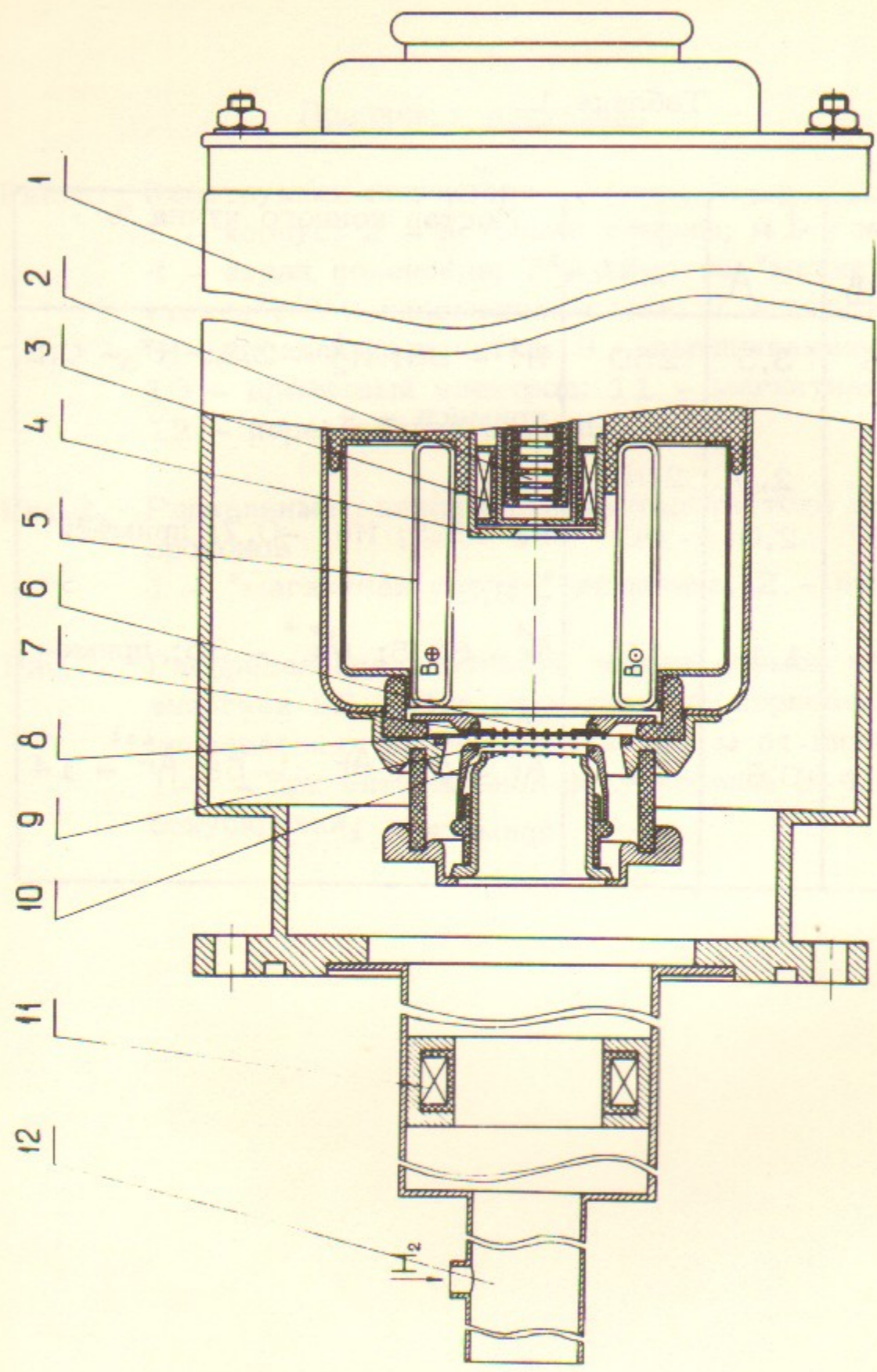


Рис. 1.

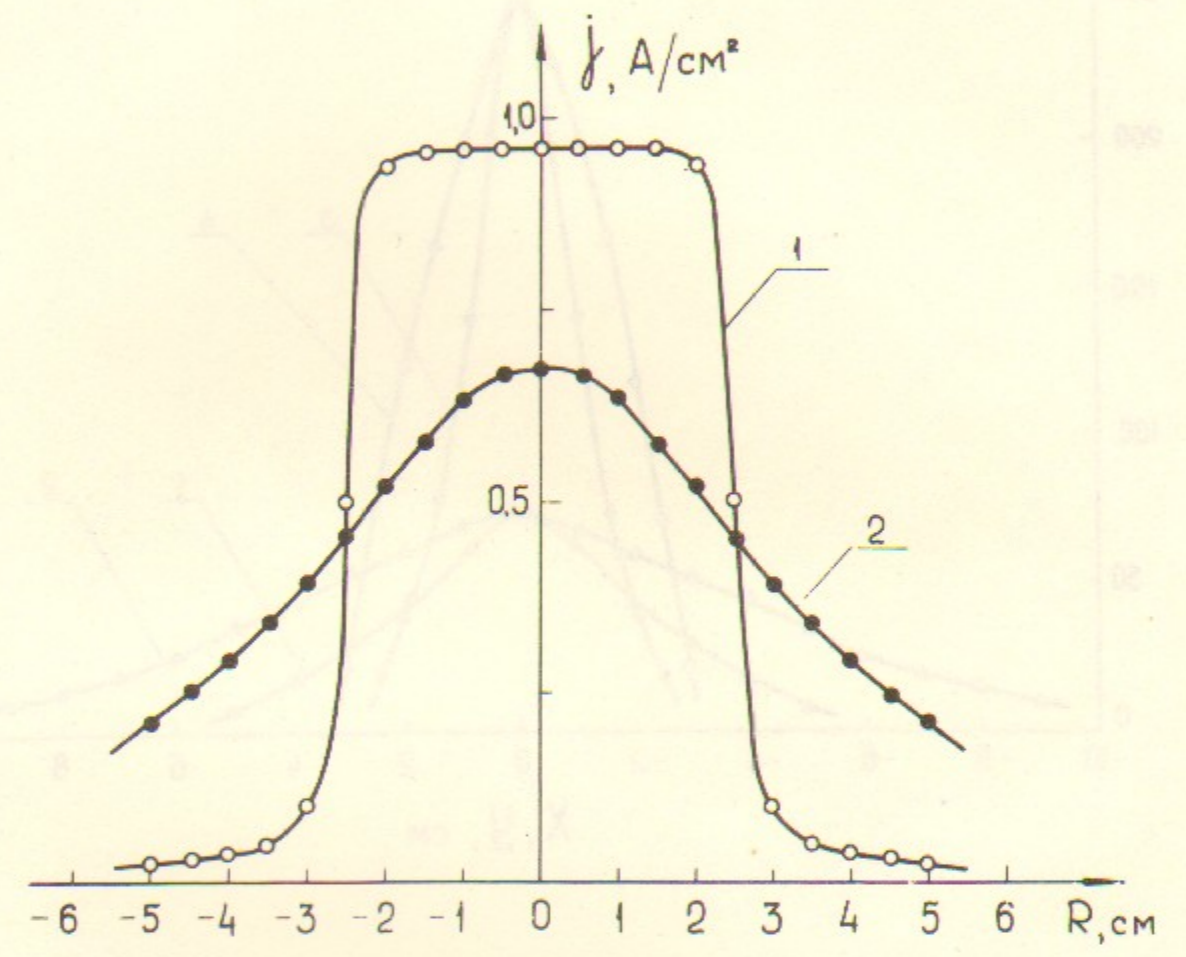


Рис. 2.

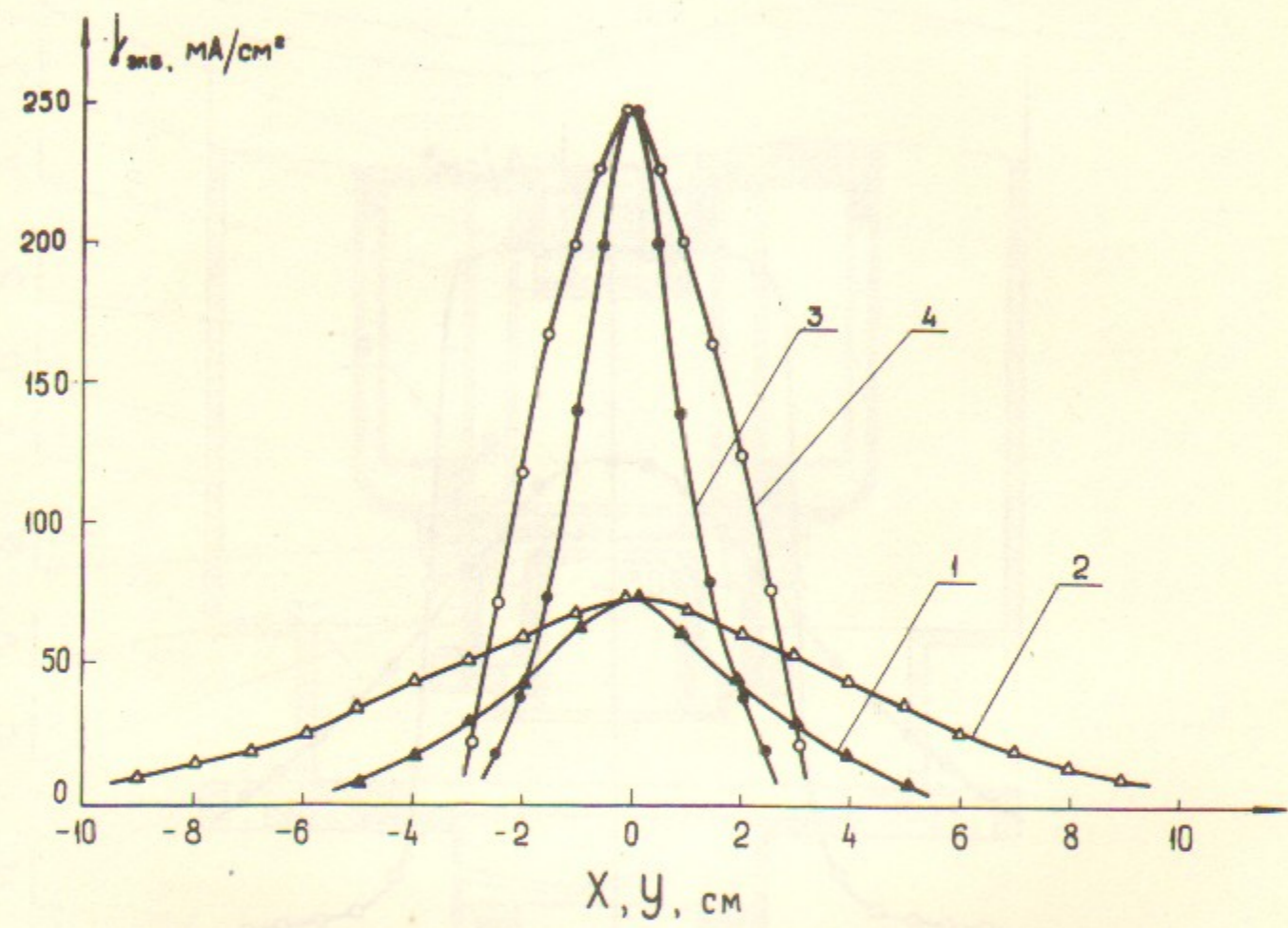


Рис.3.