

10

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР



А.А.Иванов, А.А.Кабанцев, Г.В.Росляков.

МНОГОХОРДОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ
ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ БЫСТРЫХ АТОМОВ
ВОДОРОДА

ПРЕПРИНТ 83-15

Новосибирск

МНОГОХОРДОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ БЫСТРЫХ
АТОМОВ ВОДОРОДА

А.А.Иванов, А.А.Кабанцев, Г.В.Росляков

А Н Н О Т А Ц И Я

Описана разработанная на базе диагностического инжектора атомов ДИНА схема многохордового зондирования плазмы пучком быстрых атомов водорода с целью определения радиального профиля плотности плазмы $n(r)$. Существенным достоинством данной методики является возможность проводить одновременные измерения по произвольному числу хорд. Приведены результаты многохордового зондирования струи низкотемпературной плазмы газоразрядного источника, предназначенного для создания "мишенной" плазмы в открытой магнитной ловушке АМБАЛ.

МНОГОХОРДОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ
БЫСТРЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА

А.А.Иванов, А.А.Кабанцев, Г.В.Росляков

Зондирование плазмы быстрыми атомами водорода позволяет находить радиальное распределение плотности плазмы по ослаблению интенсивности зондирующих пучков, проходящих по различным хордам. Сечения процессов перезарядки и ударной ионизации протонами и электронами, приводящих к выбыванию атомов из пучка, хорошо известны /1,2/. В случае, когда энергия зондирующего пучка атомов водорода составляет несколько кэВ, ослабление происходит в основном за счет резонансной перезарядки. Интеграл плотности плазмы вдоль выбранной хорды связан с величиной начального J_0 и прошедшего через плазму J тока зондирующего пучка соотношением:

$$\int n dl = \frac{1}{\sigma_{tot}} \ln(J_0/J)$$

где σ_{tot} - сумма сечений перезарядки и ионизации, усредненных по функции распределения частиц плазмы с учетом относительного движения пучка.

Восстановление по этим данным распределения плотности плазмы дается в общем случае обращением преобразования Радона (см. например /3/), которое в случае азимутальной симметрии сводится к хорошо известному преобразованию Абеля:

$$n(r) = -\frac{1}{\sigma_{tot}} \int_r^R \frac{J(y)}{J_0(y)} \frac{J_0'(y)}{J(y)} \frac{dy}{(y^2-r^2)^{1/2}} \quad (1)$$

Здесь R - внешний радиус плазмы ($n(R)=0$), а y - расстояние от хорды до оси симметрии.

Экспериментальная реализация данной методики на плазменных установках чаще всего связана с использованием одноканальной аппаратуры, перемещаемой в промежутках между разрядами на различные хорды /4,5/, что накладывает жесткие требования на воспроизводимость параметров плазмы. Стремление получить инфор-

мацию о распределении плотности плазмы за один разряд привело авторов работы /6/ к созданию системы многократной электростатической развертки зондирующего пучка по сечению плазмы. Полное время измерения распределения плотности с использованием II хорд составило в этих экспериментах $1,1 \cdot 10^{-4}$ сек.

Нами разработана и экспериментально опробована схема многохордового зондирования, позволяющая проводить одновременные измерения по произвольному числу хорд.

Экспериментальная схема многохордового зондирования

Общая схема используемого диагностического комплекса приведена на рис.1. Протонный пучок из диагностического инжектора (1) фокусируется цилиндрической магнитной линзой (2). В фокусе линзы расположена импульсная водородная мишень (3), в которой до 90% ионов пучка перезаряжаются в атомы. Оставшиеся заряженные частицы убираются магнитным сепаратором (4). Сформированный таким образом сильно расходящийся по одной из координат пучок быстрых атомов проходит через все поперечное сечение плазмы (5) и после обдирки в импульсной гелиевой мишени (6) регистрируется системой токоприемников (7), расположенных на выбранных хордах.

Источник протонов, представляющий собой модификацию диагностического инжектора атомов /7/, имеет следующие характеристики: ток пучка до 3,5 А (H^+); энергия - 3+15 кэВ, длительность импульса - 10+200 мксек; частота повторения импульсов - до 1 Гц. Протонный пучок имеет достаточно малую локальную угловую расходимость, которая различна по двум взаимно перпендикулярным поперечным координатам и при энергии 10 кэВ составляет $3 \cdot 10^{-3}$ х $7 \cdot 10^{-3}$ рад /7/.

Магнитная линза-короткофокусная ($f \approx 15$ см при энергии 10 кэВ), конструктивно выполнена в виде бронированной прямоугольной рамки с током с размерами 6 х 20 см (рис.2).

Схема использованного токоприемника приведена на рис.3. На сетку (2) подавался потенциал - 300 В для зашоривания вторичной электронной эмиссии с поверхности коллектора (1) и заземленной "охранной" сетки (5). Коллимация пучка атомов осуществлялась

с помощью стальной трубки с ребристой внутренней поверхностью.

Для достижения максимальной плотности тока на токоприемниках и тем самым увеличения отношения "сигнал/шум", фокусировку необходимо производить по координате с наибольшей угловой расходимостью. При этом желательно, чтобы собственные нелинейные искажения углов в линзе не превышали на размере пучка величину неупорядоченной угловой расходимости ($3 \cdot 10^{-3}$ х $7 \cdot 10^{-3}$ рад). Это было достигнуто оптимизацией формы полюсов, выполненной с помощью двумерных расчетов на ЭВМ магнитных полей и движения в них протонов пучка (рис.2). Учет конечных размеров вдоль оси

X для данной геометрии линзы не приводит к существенному изменению полученных результатов.

Расчетные и экспериментально измеренные распределения плотности потока атомов в плоскости, где расположены токоприемники приведены на рис.4. Исходная функция распределения в пучке задавалась в виде:

$$f(x, y, v_x, v_y, v_z) = n(\sqrt{x^2 + y^2}) \frac{4}{\pi} \frac{v_z^2}{\alpha \beta} \exp\left\{-\alpha \left(\frac{v_x}{v_z}\right)^2 - \beta \left(\frac{v_y}{v_z}\right)^2\right\} \delta(v_z - v_{z0})$$

$$n(\sqrt{x^2 + y^2}) = \begin{cases} n_0, & \sqrt{x^2 + y^2} \leq r_0 \\ 0, & \sqrt{x^2 + y^2} > r_0 \end{cases}$$

$r_0 = 1,4$ см - начальный радиус пучка; α, β - квадраты обратных величин соответствующих угловых расходимостей. Плотность потока в перефокусированном атомарном пучке в плоскости, где расположены токоприемники равна:

$$J = \frac{4\pi n_0 v_{z0}}{\pi} \int_{-r_0}^{r_0} \int_{-r_0}^{r_0} \exp\left\{-\beta \left(\frac{v_y}{v_z}\right)^2\right\} \cos\left(\sqrt{\left(\frac{v_x - v_z}{v_z}\right)^2 + \left(\frac{v_y - v_z}{v_z}\right)^2}\right) \frac{\exp\left\{-\alpha \left(\frac{v_x - v_z}{v_z}\right)^2\right\}}{(v_x + v_z)(v_x - v_z) + (v_y + v_z)(v_y - v_z)} dz$$

Здесь l_1 - расстояние от места старта пучка до линзы, l_2 - от линзы до токоприемников. В расчетах линза принималась идеальной и цилиндрической.

Разработанная схема многохордового зондирования была использована для определения радиального профиля плотности в струе низкотемпературной плазмы из газоразрядного источника, предназначенного для создания "мишенной" плазмы в открытой магнитной

ловушке АМБАЛ. Разряд с длительностью 200 мксек горел в кольцевом диафрагмированном канале со средним диаметром 13 см /8/.

Определение профиля плотности плазмы в струе проводилось на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 5. Плазменная пушка находилась в импульсном (длительностью 2,5 мсек) магнитном поле соленоида (I), величина которого могла меняться до 5 кГс. Струя плазмы из кольцевой пушки в виде полого цилиндра распространялась вдоль силовых линий через буферный объем (3) и поступала в пробкотрон с пробочным отношением равным 2-м и полем в центре 3,5 кГс. Плотность плазмы в струе $2-3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, температура $10+15 \text{ эВ}$, степень ионизации плазмы 99,9%. Зондирующий пучок инжектировался в центральной плоскости пробкотрона. Ослабления пучков атомов водорода с энергией 10 кэВ измерялись по восьми равноотстоящим друг от друга по радиусу плазменной струи хордам.

Управление элементами диагностического комплекса и оперативная обработка экспериментальных данных осуществлялись с помощью системы автоматизации, подробно описанной в /9/. Сигналы с токоприемников через блок усиления и два четырехканальных коммутатора аналоговых сигналов поступали на вход двух аналого-цифровых преобразователей и далее уже в цифровом виде в ЭВМ Электроника-60, где по заданным программам производилось восстановление распределения плотности плазмы по радиусу в сечении плазменной струи. Используемые коммутаторы позволяли работать с временным разрешением 4 мксек на канал.

Интегральное преобразование Абеля для восстановления распределения $n(r)$ принадлежит к классу некорректно поставленных задач математической физики /10/. Это находит свое выражение в том, что при наложении случайных шумов на подинтегральную функцию ослабления зондирующих пучков $(J(y)/I_0(y))$, интегральному уравнению (I) начинает удовлетворять широкий набор функций $n(r)$.

Основным источником таких шумов в наших экспериментах была нестабильность тока пучка, связанная с проникновением импульсных магнитных полей в обдирочную гелиевую мишень. Вследствие отмеченной нестабильности в подинтегральной функции возникал

шум, так как система обработки информации предусматривала измерение тока в каждый из приемников дважды - без разряда (измерение величины J_0) и с разрядом (J). Последовательные импульсы пучка с включенным магнитным полем установки отличались на $\leq 3\%$ (без включения магнитного поля величина нестабильности тока в каждый из приемников в серии из ~ 20 импульсов не превышала 0,5%).

Другой источник погрешностей связан с выбранными способами измерений токов приемников и аппроксимации экспериментальных точек. Токосигналы преобразовывались из аналогового вида в цифровой с ошибкой $\leq 0,2\%$. Ошибка при аппроксимации предполагаемого распределения ослаблений токов по 8 хордам кубическим сплайном исследовалась численно и составила не более 0,4% для отношения токов и 0,8% для $(J/J_0)^4$.

Оцененная полная величина шумов в подинтегральном выражении в формуле (I) не превышала 5%.

Было проведено численное исследование на ЭВМ влияния шумов на точность восстановления распределения $n(r)$. По заданному распределению $n(r)$, близкому к предполагаемому, насчитывались точные значения $J(y)$ $J_0(y)$, после чего в эти точные значения вводился случайный разброс на уровне 5%, что соответствует реальной величине шумов. Сравнение исходного распределения

$n(r)$ и распределения, полученного восстановлением по значениям ослаблений зондирующих пучков со случайным разбросом (рис.6), позволяет сделать вывод, что соответствующая ошибка в восстановлении профиля плотности плазмы $n(r)$ не превышает 15%. Погрешность, с которой известны сечения резонансной перезарядки и ударной ионизации (σ_{tot}), составляет $\pm 20\%$ /1/ и сказывается только на абсолютной величине плотности плазмы.

Характерный профиль, восстановленный по многохордовому зондированию плазменной струи, приведен на рис.7.

Л и т е р а т у р а :

1. *C.F. Barnett. et al. Atomic data for fusion research. ORNL-5206, 1977*
2. Чернетский А.В., Зиновьев О.А., Козлов О.В. Аппаратура и методы плазменных исследований, 1965.
3. Мельникова Т.С., Пикалов В.В. Препринт Института теплофизики СО АН СССР 80-82, 1981.
4. Березовский Е.Л., Кисляков А.И., Михайлов Е.А. Письма в ЖЭТФ, 1974, т.19, № 5, 283.
5. *Equipe TFR. Nucl. Fusion, 1978, 18, 647.*
6. Афросимов В.В., Березовский Е.Л., Кисляков А.И. Физика плазмы, 1979, 5, 753.
7. Давыденко В.И., Морозов И.И., Росляков Г.В. Физика плазмы, 1981, 7, 464.
8. Димов Г.И., Иванов А. ..., Росляков Г.В. Физика плазмы, 1982, 8, 970.
9. Иванов А.А., Карлинер В.М., Коваленко Ю.В. Система автоматизации физического эксперимента на плазменной установке МАЛ. Труды второго Всесоюзного семинара по автоматизации научных исследований в ядерной физике и смежных областях. Новосибирск, 1982 г.
10. Кузнецов Э.И., Щеглов Д.А. Методы диагностики высокотемпературной плазмы, 1980.

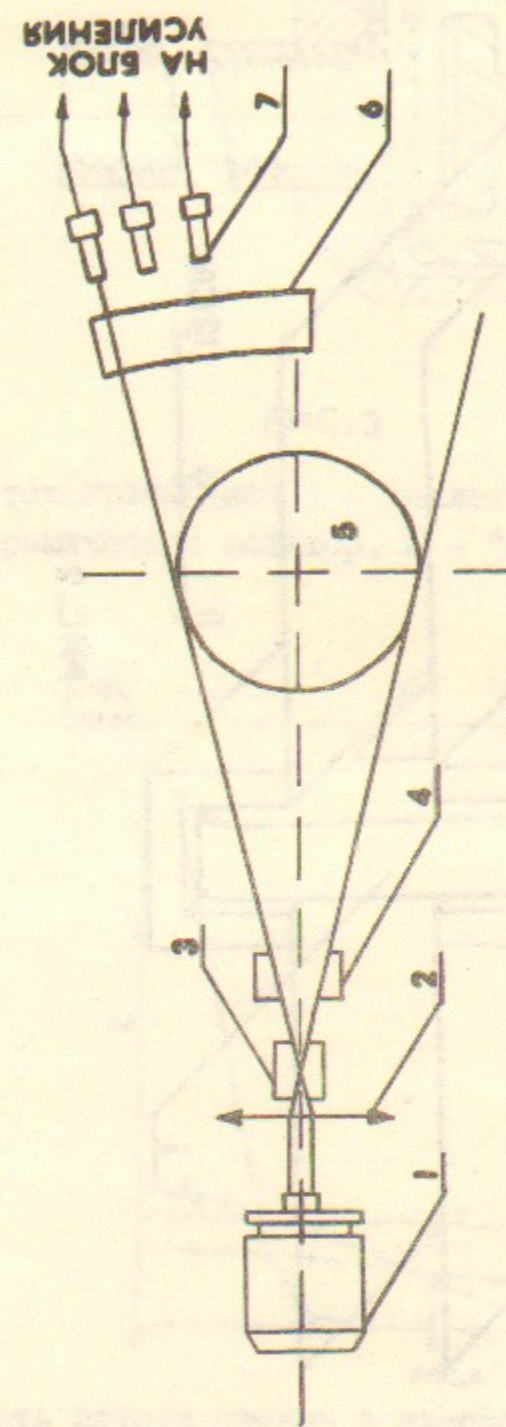


Схема диагностического комплекса: 1 - диагностический инжектор, 2 - магнитная линза, 3 - водородная мишень, 4 - магнитный селектор, 5 - сечение плазменной струи, 6 - тепловая мишень, 7 - токоприемники.

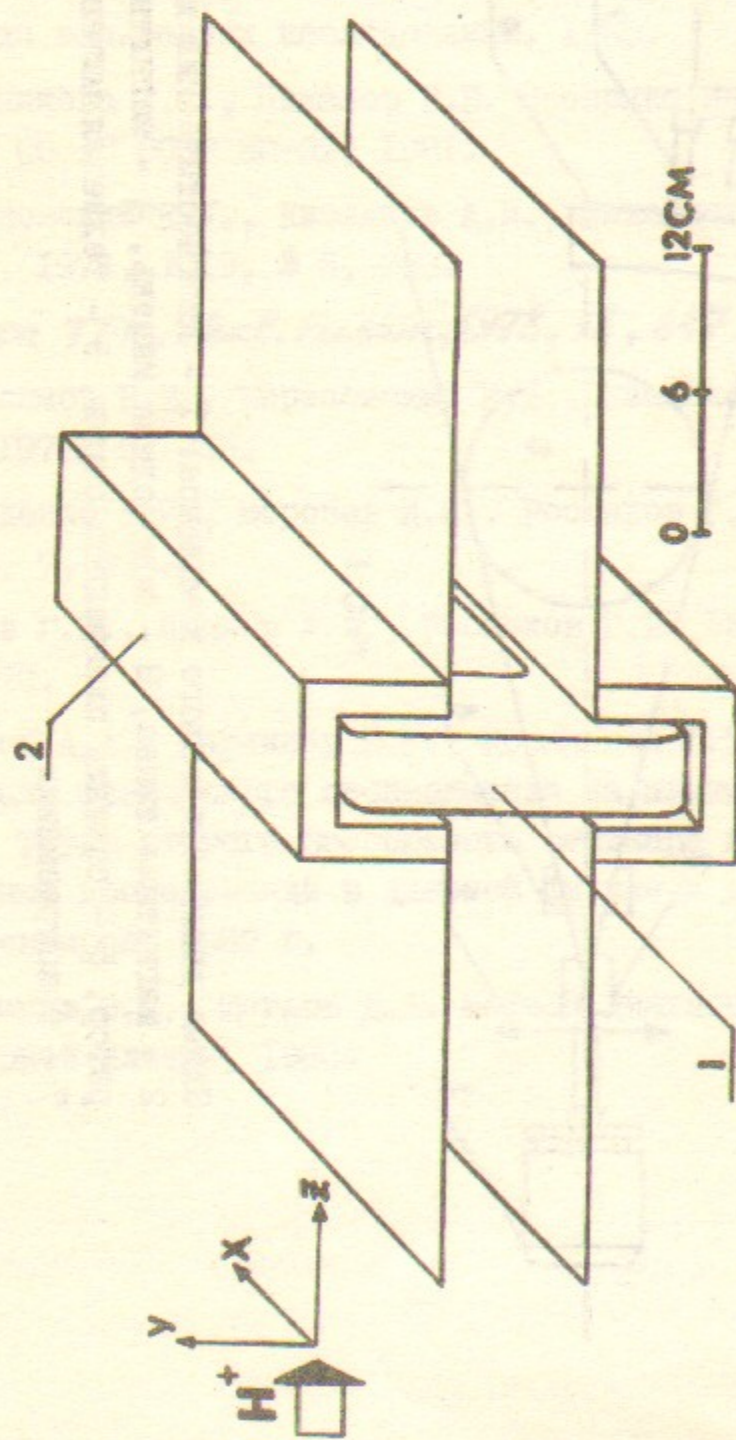


РИС.2

Магнитная линза: 1 - рамка с током, 2 - железное ядро.

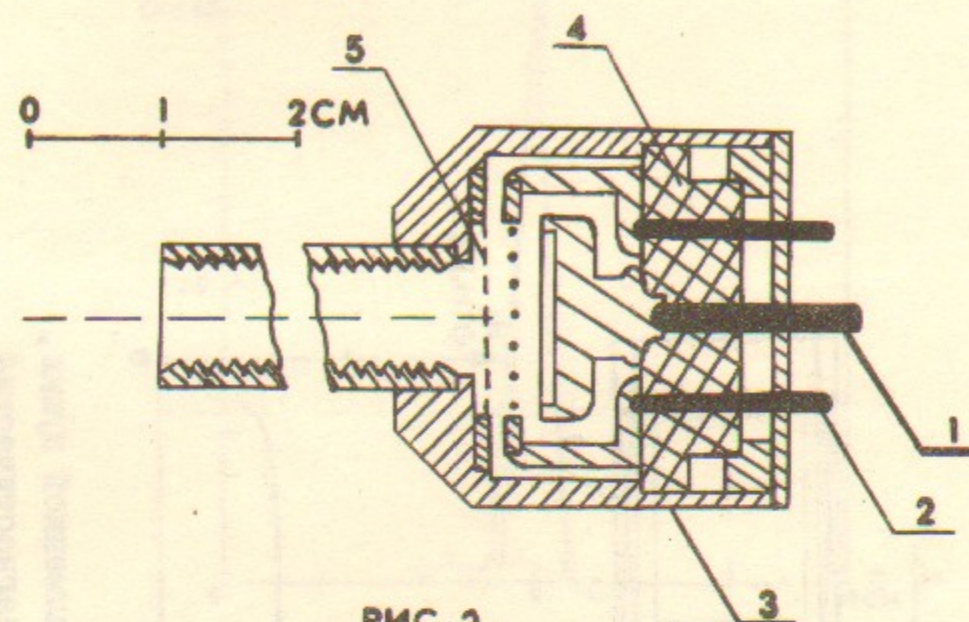


РИС.3

Схема токоприемника: 1 - коллектор, 2 сетка, 3 - корпус, 4 - керамический изолятор, 5 - "охранная" сетка.

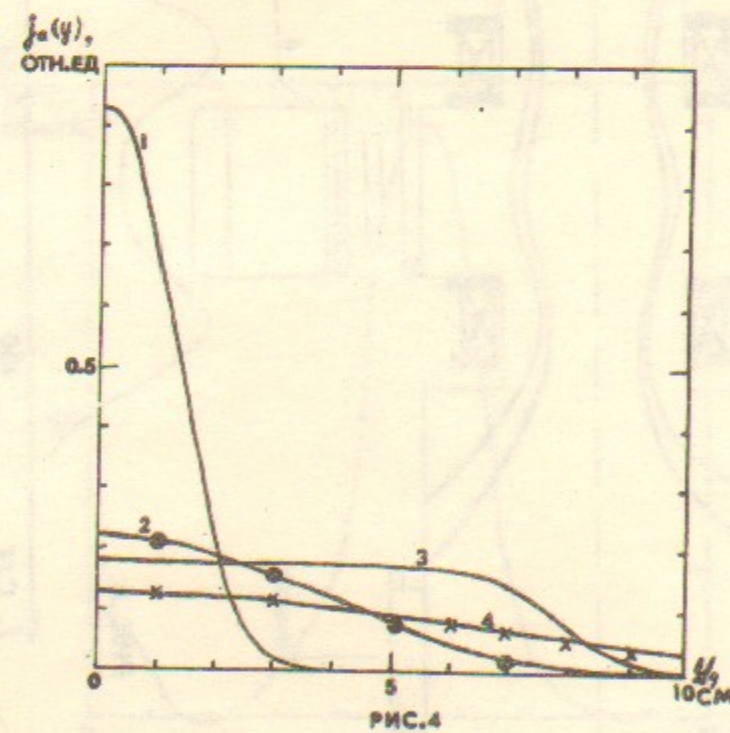


РИС.4

Плотность потока атомов в плоскости токоприемников:
 1,2 - расчетные без фокусировки, $\alpha = 2 \cdot 10^4$, $\beta = 1, 1 \cdot 10^5$ и
 $\alpha = 10^3$, $\beta = 10^4$ соответственно. 3,4 - расчетные с фокуси-
 ровкой, α и β те же.

⊙ - экспериментальные без фокусировки.
 × - экспериментальные с фокусировкой.

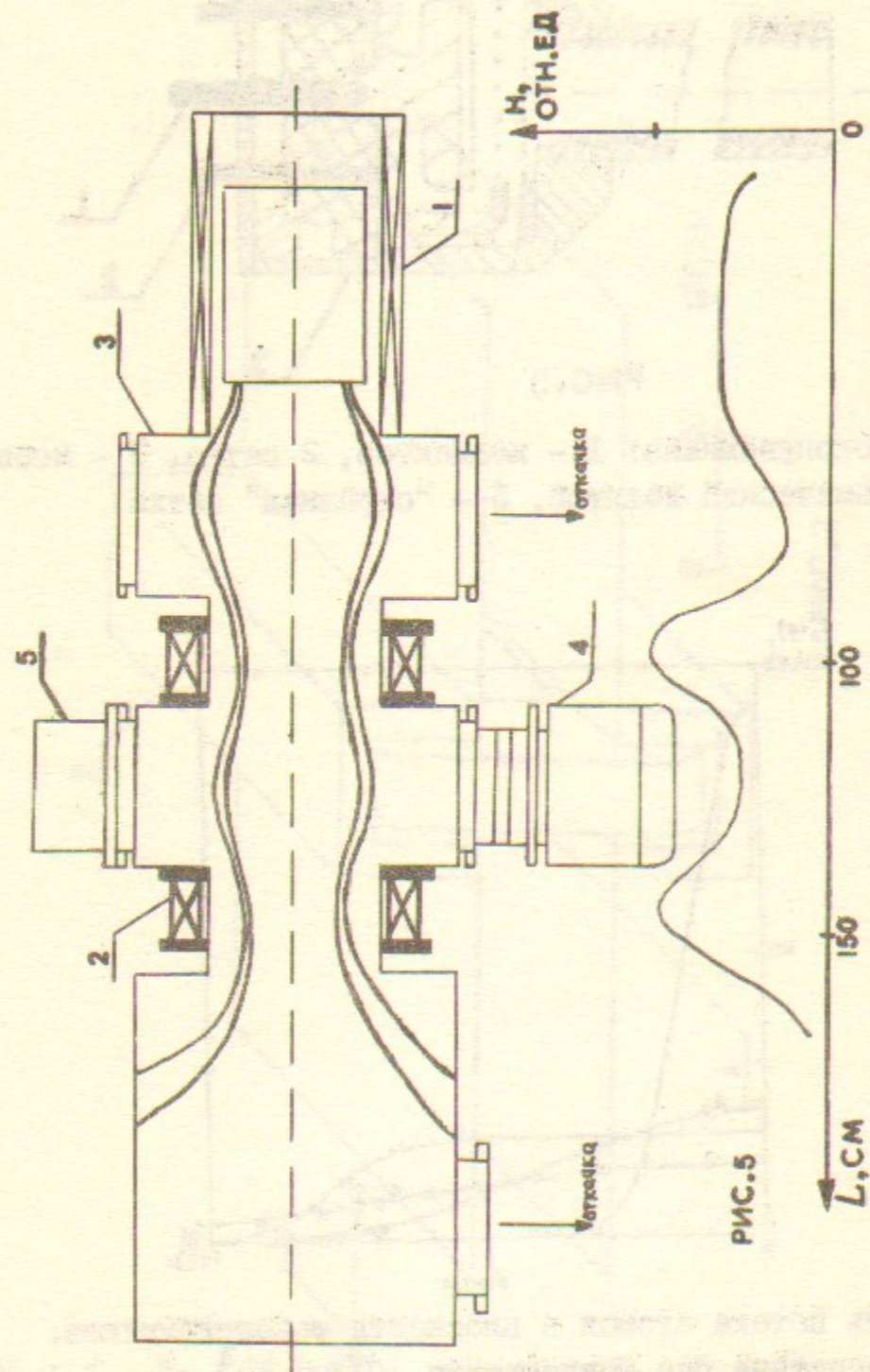


РИС.5

Схема экспериментальной установки: 1 - соленоид плазменной пушки, 2 - катоды пробкотрона, 3 - буферный объем, 4 - диагностический комплекс, 5 - система регистрации.

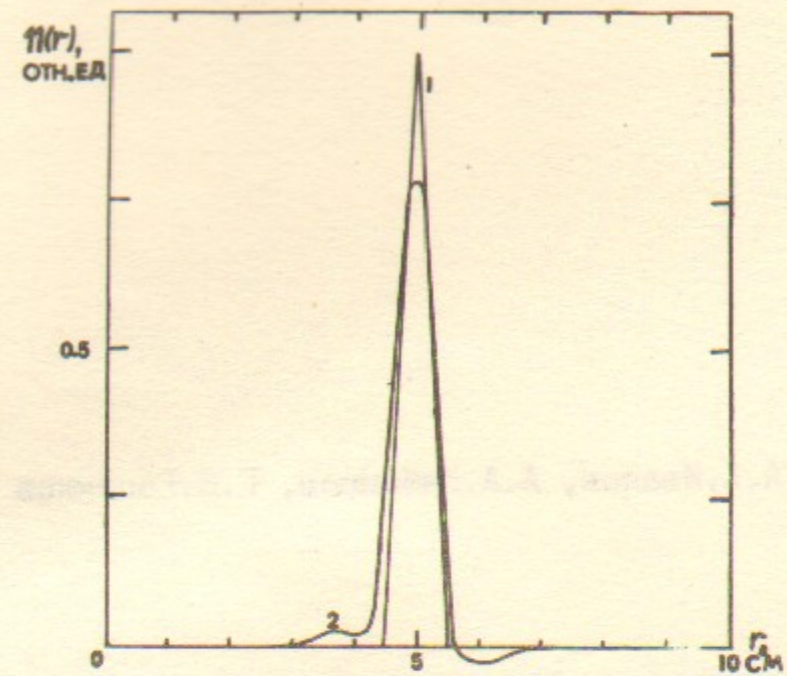


РИС.6

Моделирование восстановления профиля плотности плазмы: 1 - точное распределение, 2 - восстановленное с 5% шумом в подынтегральном выражении.

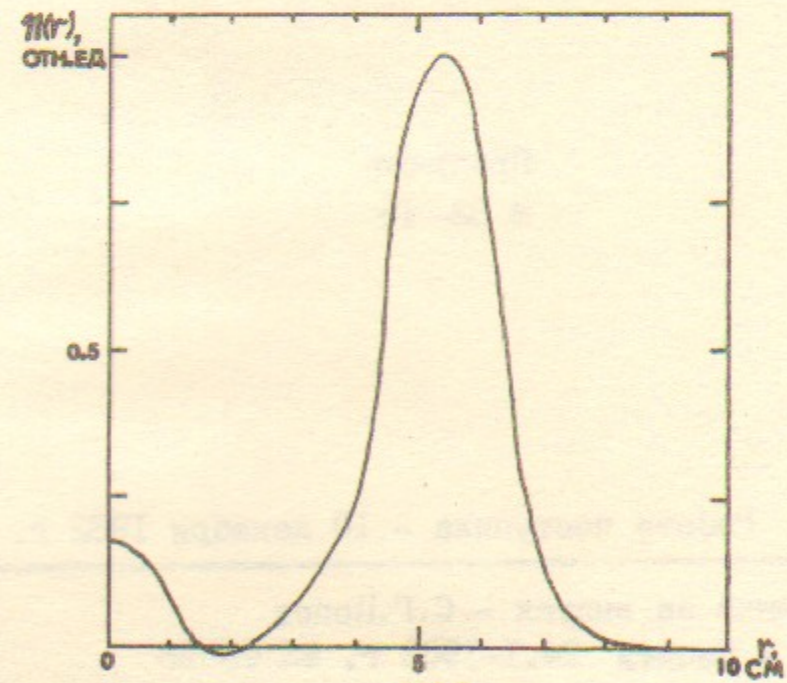


РИС.7

Радиальное распределение плотности в плазменной струе.

А.А.Иванов, А.А.Кабанцев, Г.В.Росляков

МНОГОХОРДОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ БЫСТРЫХ
АТОМОВ ВОДОРОДА

Препринт
№ 83-15

Работа поступила - 10 декабря 1982 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 24.1-1983 г. МН 03026
Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.0,8 печ.л., 0,6 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 15.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90