

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПЛОТНОСТИ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ В ПЛАЗМЕ С ПОМОЩЬЮ АКТИВНОЙ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Е. Л. Березовский, В. С. Заверьяев, А. А. Медведев, С. П. Любарцева

Одним из основных каналов энергетических потерь из поной компоненты в токамаках является перезарядка. Для учета ее роли необходима информация о пространственном распределении концентрации атомов в плазме. На протяжении длительного времени такая информация обеспечивалась почти исключительно численным моделированием [1]. Однако в последнее время возникла необходимость в получении более достоверных данных о концентрации нейтралов, связанная с расчетами энергетического и материального баланса плазмы. В такой ситуации была бы крайне полезна экспериментальная методика для непосредственного определения профиля концентрации нейтралов. Достаточно прямым способом решения данной задачи является экспериментальная методика, использующая резонансную флуоресценцию на характеристических линиях. Применение с этой же целью пассивной корпускулярной диагностики требует привлечения данных о концентрации и энергетическом распределении ионов плазмы, получение которых само по себе является сложной и не всегда успешно решаемой задачей. Использование метода активной корпускулярной диагностики [2] открывает новые возможности для определения плотности атомов, в частности позволяет обойтись без дополнительной информации о плотности и энергетическом распределении ионов. Методика такого рода, реализованная на установке Т-10, описана в данной работе.

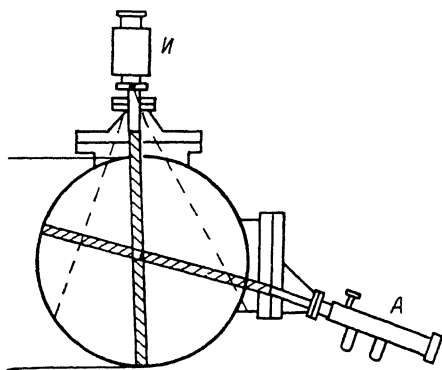


Рис. 1. Схема эксперимента.

И создавал пучок атомов водорода, пересекающий линию наблюдения. Во время инжекции регистрировался суммарный поток атомов, обусловленный перезарядкой ионов как на нейтралах плазмы, так и на пучке. Вычитая из этого сигнала «пассивную» составляющую (измеренную до инжекции), получаем зависимость «активного» сигнала от энергии. От импульса к импульсу угол инжекции изменялся так, что локальная мишень смещалась по линии наблюдения анализатора. Таким образом были получены зависимости «активного» сигнала от энергии для различных положений мишени (рис. 2).

Предполагая аксиальную симметрию параметров плазмы, получаем следующее выражение для «пассивного» сигнала:

$$N_p(E) = k\sigma_{cx}(E) v_i \int_{-a}^{+a} n_a(r) \frac{\partial n_i(E, r)}{\partial E} \varepsilon_a(E, r) dr, \quad (1)$$

где  $N_p$  — величина «пассивного» сигнала в импульсах;  $E$  — кинетическая энергия частиц,

$$k = \alpha(E) \frac{\omega S}{4\pi} \Delta t \Delta E(E),$$

$\alpha$  — эффективность регистрации атомов перезарядки,  $\omega$  — средний телесный угол коллиматора,  $S$  — площадь входного отверстия анализатора,  $\Delta t$  — длительность регистрации,  $\Delta E$  — энергетическая ширина соответствующего канала анализатора,  $\sigma_{cx}$  — сечение резонансной перезарядки,  $v_i$  — скорость ионов,  $n_a$  — плотность атомов,  $n_i$  — плотность ионов,  $\varepsilon_a$  — коэффициент ослабления потока атомов перезарядки,  $a$  — малый радиус плазмы.

Для «активного» сигнала справедлива следующая формула:

$$N_a(E, r) = k\sigma_{cx}(E_b) v_b n_b \varepsilon_b(r) \frac{\partial n_i(E, r)}{\partial E} \varepsilon_a(E, r) db, \quad (2)$$

здесь  $v_b$  — скорость атомов пучка,  $E_b$  — энергия пучка,  $n_b$  — концентрация атомов в пучке,  $\epsilon_b$  — коэффициент ослабления пучка до точки перезарядки,  $d_b$  — эффективный диаметр пучка.

Очевидно, что

$$k \frac{\partial n_i(E, r)}{\partial E} \epsilon_a$$

можно исключить из (1), выразив через известные параметры пучка величину «активного» сигнала и коэффициент ослабления пучка, определяемый расчетным путем. В итоге после элементарных преобразований получаем

$$N_p(E) = \frac{\sigma_{cx}(E) v_b}{\sigma_{cx}(E_b) j_b d_b} \int_{-b}^{+a} n_a(r) \frac{N_a(E, r)}{\epsilon_b} dr, \quad (3)$$

где  $n_a$  — эквивалентная плотность тока пучка.

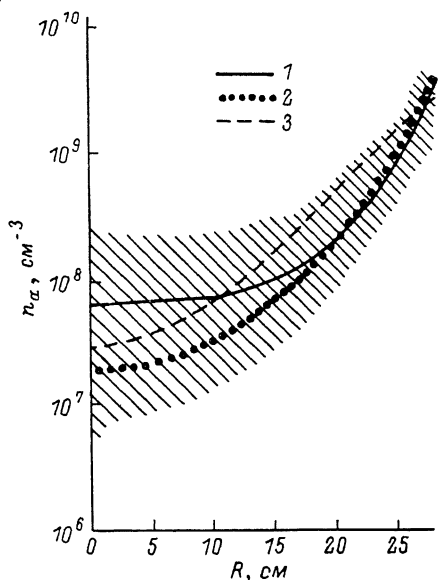
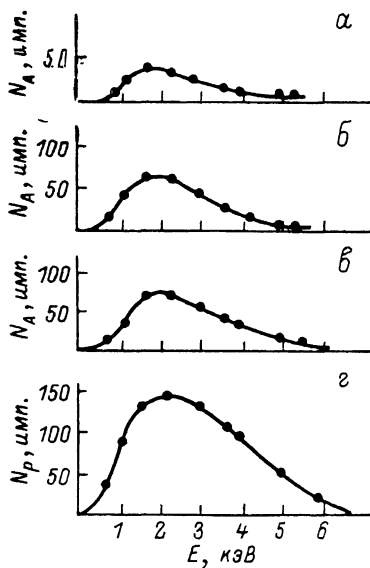


Рис. 2. Зависимости «активного» (а–в) и «пассивного» (г) сигналов от энергии.

Время регистрации  $\Delta t = 200$  мкс. а —  $r = 0$ , б — 10, в — 19 см.

Рис. 3.

1 — полученный профиль концентрации атомов для разряда с  $B_0 = 1.7$  Тл,  $I_p = 220$  кА,  $\bar{n}_e = 3.5 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ ,  $\alpha_z = 28$  см. Энергия пучка  $E_b = 20$  кэВ. Результаты расчета проникновения нейтралов в плазму для этого же режима: 2 — начальная энергия атомов  $E_0 = 2$ , 3 — 50 эВ.

Таким образом, задача определения профиля плотности атомов сводится к решению интегрального уравнения I рода, ядро которого определено экспериментально. В работе [5] показано, что подобная задача является некорректно поставленной. Решение таких задач требует применения специальных методов, которые развиты в работах [5, 6]. Возможность определения приближенного решения некорректно поставленной задачи, устойчивого к малым изменениям исходных данных, основывается на использовании дополнительной информации относительно решения, как правило, на тех или иных физических представлениях. В нашем случае в соответствии с [7] решение определялось в классе функций

$$n_a(r) = a + b \operatorname{ch}(cr).$$

Полученное квазирешение для (3) удовлетворительно согласуется с результатами численного моделирования (рис. 3). Штриховкой показан коридор ошибок, соответствующий экспериментальной погрешности, для профиля, полученного с помощью описанной методики. Как видно, погрешность весьма велика. Однако, здесь необходимо отметить, что ошибка результата полностью определяется статистикой измерений потоков атомов перезарядки, которая в дальнейших экспериментах будет существенно улучшена. Кроме того, для уточ-

нения результатов необходимо ввести расчетную поправку для учета «галло» из нейтральных атомов в области пучка.

Авторы выражают благодарность Ю. Н. Днестровскому за плодотворные обсуждения.

### Литература

- [1] *Ивочкиков А. Б., Петров М. П.* Физика плазмы, 1976.
- [2] *Афросимов В. В., Петров М. П., Садовников В. А.* Письма в ЖЭТФ, 1973.
- [3] *Гладковский И. П., Ивочкиков А. Б., Петров М. П.* Тез. докл. II совещ. по диагностике высокотемпературной плазмы. Харьков, 1977, с. 79.
- [4] *Давыденко В. И., Морозов И. И., Росляков Г. В.* Препринт ИЯФ СО АН СССР, № 80118. Новосибирск, 1980.
- [5] *Тихонов А. Н., Арсенин В. А.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.
- [6] *Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г.* Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983.
- [7] *Днестровский Ю. Н., Костомаров Д. П., Лысенко С. Е.* Препринт ИАЭ, № 2908. М., 1977.

Поступило в Редакцию

26 июня 1986 г.

В окончательной редакции

10 декабря 1986 г.

*Журнал технической физики, т. 58, в. 12, 1988*

## РАВНОВЕСНЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО ЖИДКОГО ЭЛЕКТРОДА В ВАКУУМЕ

*В. А. Барлетов, В. П. Коваленко, А. М. Рудько*

В последние годы в связи с разработкой жидкометаллических эмиттеров электронов, ионов, заряженных кластеров и капель возрос интерес к взаимодействию проводящей жидкости с электрическим полем, в частности к исследованию устойчивости этой системы. В этих задачах нельзя обойтись без представлений о механическом равновесии искривленной поверхности проводящего жидкого электрода.

Несмотря на важность вопроса о равновесии, его разработка далека от завершения. Так, в большинстве работ, касающихся в той или иной степени равновесия формы поверхности жидкости в электрическом поле, цитируется работа Тейлора [1]. Между тем найденная Тейлором коническая поверхность может реализоваться лишь при определенных условиях (бесконечно протяженные электроды заданной геометрии, определенная разность потенциалов между ними). Кроме того, в теоретическом плане совершенно не ясна ситуация на вершине конуса. Оказывается, что с нее испускается струйка жидкости конечной толщины [1], т. е. фактически равновесия жидкости нет.

Аргументированная критика широкого безосновательного использования результатов Тейлора содержится в работах [2, 3]. Однако в первой из них авторы при формулировке условий равновесия допустили ошибку — используя энергетические соображения для нахождения действующей на поверхности силы, не учли, что система не замкнута. Близка к правильной постановка задачи, приведенная в [3], но и там (см. ниже) использовано граничное условие, не имеющее достаточного обоснования. Таким образом, приходится констатировать, что вопрос о равновесии до настоящего времени корректно даже не сформулирован.

В настоящей работе обсуждаются условия действительно равновесной формы поверхности жидкости, граничащей с электрическим полем, и приводятся соответствующие экспериментальные данные.

Рассмотрим следующую аксиально-симметричную диодную систему электродов, находящуюся в вакууме (рис. 1). Наружный электрод 1 считаем жестким, имеющим известную заданную форму  $z_1(r)$ . Потенциал этого электрода полагаем равным нулю. Жестким считаем и внутренний электрод 2, профиль которого  $z_2(r)$  также известная заданная функция. Этот электрод контактирует с проводящей смачивающей жидкостью заданного объема  $V$  (штри-