

## МАГНИТОЗВУКОВОЙ НАГРЕВ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ Т-4

Н.В.Иванов, И.А.Кован, Ю.А.Соколов

В последнее время в литературе обсуждается возможность создания двухкомпонентного токамака-реактора [1 – 6]. В этом реакторе, имеющем параметры плазмы не очень сильно отличающиеся от достигнутых на существующих токамаках, положительный выход термоядерной энергии получается за счет искусственного поддержания немаксвелловского распределения ионного компонента плазмы по скоростям. При этом, поскольку интенсивность термоядерной реакции при температуре плазмы масштаба нескольких килоэлектронвольт весьма чувствительна к виду функции распределения ионов, обогащение распределения ионами высоких энергий приводит к существенному росту термоядерного выхода. Для получения немаксвелловской плазмы могут быть использованы как метод инжекции нейтральных атомов [1], так и метод магнитозвукового нагрева на ионной циклотронной частоте в плазме, состоящей из двух сортов ионов (например, тритиевая плазма, имеющая небольшую добавку дейтерия, на циклотронной частоте которого производится нагрев) [6].

Магнитозвуковой метод, экспериментальной проверке которого посвящена настоящая работа, основан на характере зависимости поляризации магнитозвуковой волны от соотношения между частотой колебаний и циклотронной ионной частотой. В плазме, состоящей из одного сорта ионов, магнитозвуковая волна имеет на частоте  $\omega = \omega_i$  круговую поляризацию, причем вектор электрического поля вращается в направлении противоположном ларморовскому вращению ионов. В этом случае циклотронное поглощение является слабым и связано только с конечной пространственной дисперсией. В плазме, состоящей из двух сортов ионов, магнитозвуковая волна, распространяющаяся на одной из двух циклотронных частот, имеет эллиптическую поляризацию и должна эффективно поглощаться, передавая свою энергию резонансным ионам. В этих условиях максимальное поглощение должно наблюдаться, когда доля резонансных ионов в плазме составляет несколько процентов [6, 7]. Резонансные ионы, получая энергию от волны и отдавая ее затем за счет торможения на нерезонансных ионах и электронах, образуют "хвост" ионной функции распределения и в случае смеси трития с дейтерием определяют повышенный термоядерный выход.

Возможность получения двухкомпонентного режима токамака была проверена нами экспериментально на установке Т-4 на модели смеси дейтерия с небольшой, составляющей несколько процентов, добавкой водорода. Для нагрева плазмы использовался ВЧ генератор, работающий на частоте 23 МГц и соединенный с возбуждающей петлей, аналогичной по конструкции [8]. Мощность, вводимая в плазму, составляла ~50 квт. Воздействие ВЧ колебаний на функцию распределения ионов изучалось по изменению энергетического спектра нейтралов перезарядки, вылетающих из плазмы под углом  $90^\circ$  к направлению тороидального магнитного поля. Анализатор позволял порознь исследовать энергетические спектры водорода и дейтерия.

Для сравнения исследовалось два режима разряда токамака, отличающиеся друг от друга значением напряженности тороидального магнитного поля  $H_z = 15 \text{ кэ}$  и  $H_z = 21 \text{ кэ}$ . В этих двух режимах концентрация плазмы поддерживалась одинаковой, равной  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  в момент включения ВЧ генератора. В режиме  $H_z = 15 \text{ кэ}$ , в котором частота колебаний совпадает с циклотронной частотой для водорода и ее второй гармоникой для дейтерия, включение ВЧ генератора приводило к возбуждению собственных магнитозвуковых колебаний плазменного шнура и сопровождалось значительным изменением функции распределения водорода (см. рис. 1, а). При этом добротность плазмы, измеренная по форме резонансных кривых [9], составляла  $Q \approx 3 \cdot 10^2$ , что удовлетворительно согласуется с оценкой добротности, полученной на основании [6]. Следует отметить, что, согласно расчетам, в данных условиях поглощению в чисто дейтериевой плазме соответствует  $Q = 3 \cdot 10^3$ , а добротность, связанная с поглощением в стенках камеры —  $Q = (2 \div 5) \cdot 10^3$ .

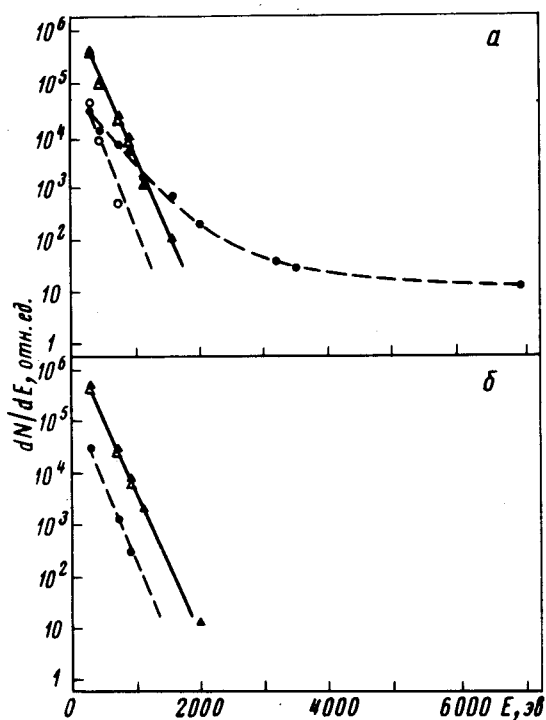


Рис. 1. Энергетические спектры атомов перезарядки водорода (пунктирная кривая) и дейтерия (сплошная кривая) в поле 15 кэ (а) и в поле 21 кэ (б). Обозначения:  $\circ$  — водород,  $\Delta$  — дейтерий в отсутствие ВЧ нагрева;  $\bullet$  — водород,  $\blacktriangle$  — дейтерий во время ВЧ нагрева. Продление прямых ниже экспериментальных точек означает, что отсчет для следующих значений энергии лежит ниже уровня фона. Анализатор расположен в сечении камеры токамака диаметрально противоположном положению ВЧ возбуждителя

Из рис. 1, а видно, что ВЧ нагрев приводит к значительному росту энергосодержания малой примеси водорода, особенно в "хвосте" ее функции распределения. Этот эффект не наблюдается в режиме  $H_z = 21 \text{ кэ}$ , когда не выполнено условие циклотронного резонанса и вследствие заперделенности не возбуждаются собственные магнитозвуковые колебания в плазме (см. рис. 1, б).

Из рис. 2, а и б, которые демонстрируют энергетические спектры нейтралов перезарядки в сечении камеры токамака, где расположен ВЧ возбуждитель, видно, что наряду с нагревом примеси водорода, происходящим только при условии циклотронного резонанса, здесь имеет место изменение функций распределения дейтерия и водорода, не зависящее от выпол-

нения резонансных условий. Это изменение связано с локальным разогревом плазмы на периферии шнура под действием ВЧ поля петли. Такое объяснение подтверждается данными о времени жизни частиц, представленными на рис. 3. Наблюдаемое время жизни протонов с энергией  $1 \text{ кэВ}$

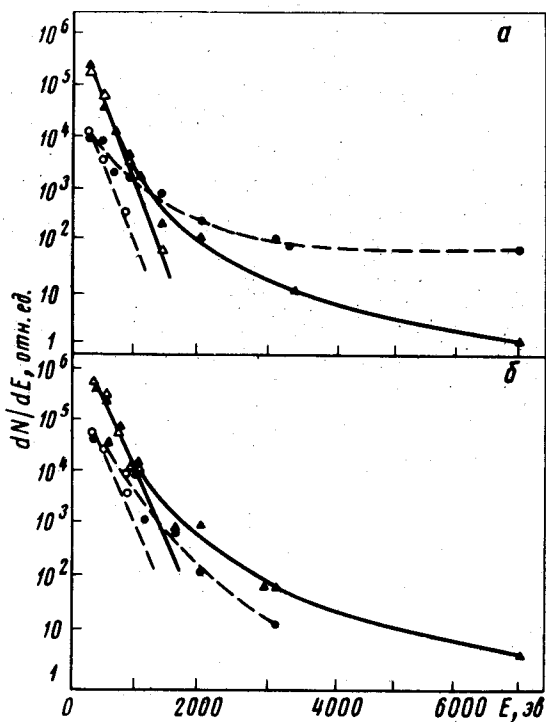


Рис. 2. Энергетические спектры атомов перезарядки в поле  $15 \text{ кэВ}$  (а) и в поле  $21 \text{ кэВ}$  (б) в сечении ВЧ возбуждителя. Все обозначения на рисунке совпадают с обозначениями рис. 1

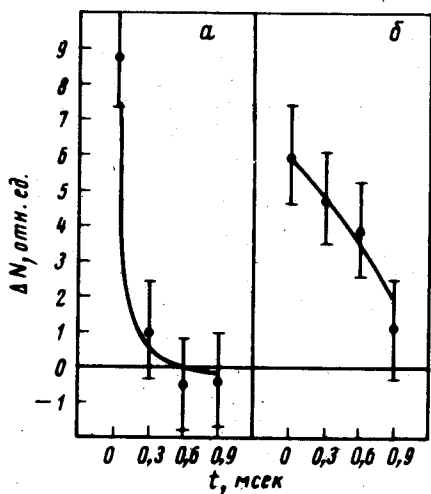


Рис. 3. Изменение во времени интенсивности потока атомов перезарядки дейтерия (а) и водорода (б) с энергией  $1 \text{ кэВ}$  после выключения ВЧ генератора. За начало отсчета принят уровень интенсивности в отсутствие ВЧ нагрева. Анализатор расположен в сечении возбуждителя

согласуется с оценкой времени их торможения на ионах дейтерия, дающей величину  $\tau \approx 1 \text{ мсек}$ , в то время как "хвост" на функции распределения дейтерия пропадает после включения ВЧ генератора за время  $\sim 100 \text{ мсек}$ .

Таким образом, в настоящей работе экспериментально подтверждена принципиальная возможность получения двухкомпонентного режима токамака путем циклотронного нагрева ионов малой примеси полями магнитозвуковой волны:

Институт атомной энергии  
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию  
9 августа 1976 г.

### Литература

- [1] I.M.Dawson, H.P.Furth, F.H.Tenny. Phys. Rev. Lett., 26, 1156, 1971.
  - [2] Р.А.Демирханов, Ю.В.Курсанов, Л.П.Скриналь. АЭ, 34, 490, 1973.
  - [3] В.И.Пистунович. АЭ, 35, 11, 1973.
  - [4] И.Н.Головин, В.И.Пистунович, Г.Е.Шаталов. Препринт ИАЭ, М., 1973.
  - [5] H. P. Furth, D.L.Jassby. Phys. Rev. Lett., 32, 1176, 1974.
  - [6] T.H.Stix, Nuclear Fusion, 15, 737, 1975.
  - [7] Р.Клима, А.В.Лонгвинов, К.Н.Степанов. ЖТФ, 46, 704, 1976.
  - [8] Н.В.Иванов, И.А.Кован, В.В.Силуянов, Н.Н.Швиндт. АЭ, 36, 374, 1974.
  - [9] Н.В.Иванов, И.А.Кован. АЭ, 38, 229, 1975.
-