

ИЗМЕРЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТОКАМАКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕЗАРЯДКИ ИОНОВ ПЛАЗМЫ НА СТРУЕ ВОДОРОДНЫХ АТОМОВ

В. В. Афросимов, М. П. Петров, В. А. Садовников

Описывается метод измерения локальных энергетических распределений ионов плазмы, основанный на инжекции в плазму потока атомов водорода и использовании этого потока в качестве искусственной мишени для резонансной перезарядки ионов. Приведены первые результаты применения этого метода на установке Токамак-6.

Одной из важнейших задач диагностики плазмы является измерение локальных энергетических распределений и температур частиц в плазме. И если в отношении электронов эта задача решена благодаря томсоновскому рассеянию света лазера на электронах, то с ионами дело обстоит гораздо сложнее. До настоящего времени измерения локальных параметров ионной компоненты в горячей плазме практически не производились. А именно эти параметры необходимы для решения вопроса о механизмах нагрева и потерь тепла ионами.

В данной статье кратко описана одна из возможностей измерения локальных параметров ионов в плазме (энергетические распределения, ионная температура T_i , плотность ионов n_i) и первые результаты ее осуществления на установке Токамак-6 [1]. Схема эксперимента изображена на рис. 1. При помощи специального инжектора 3 в плазму инжектируется коллимированная струя быстрых атомов водорода 4. Основным процессом взаимодействия струи с водородной плазмой является резонансная перезарядка ионов плазмы на атомах струи. Образовавшиеся в результате перезарядки атомы попадают в пятиканальный атомный анализатор 7, обладающий узким коллиматором 6, лишь из небольшого объема плазмы 5. Энергетическое распределение атомов перезарядки, попавших в анализатор при взаимодействии атомной струи с плазмой, соответствует энергетическому спектру ионов или в случае максвелловского распределения — ионной температуре T_i в малом объеме 5. Поворачивая ось анализатора относительно экваториальной плоскости тороидальной камеры, как это показано на рис. 1, можно

измерять значения T_i вдоль по струе атомов, т. е. получать распределение T_i по сечению плазменного шнура.

В качестве инжектора в настоящей работе использовался импульсный плазменный инжектор конического типа [2]. В процессе стендовых испытаний, проведенных авторами данной работы в ФТИ им. А.Ф.Иоффе АН СССР, было установлено, что такие инжекторы в специально подобранных режимах наряду с плотными плазменными сгустками дают интенсивные потоки атомов водорода. Были получены и исследованы атомные струи со средней энергией в диапазоне $30 \div 150$ эв с объемными концентрациями атомов водорода $n_0 \approx 10^{11}$ см⁻³. Длительность существования струй оказалась равной $\tau \approx 5$ мксек. Исследования показали, что атомы примесей в быстрой атомной струе отсутствуют и поступают из инжектора лишь спустя несколько десятков мксек в незначительных количествах.

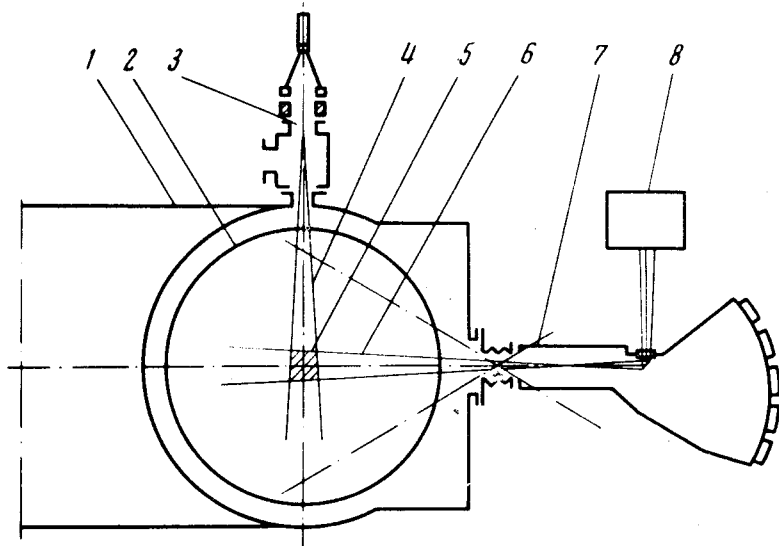


Рис. 1. 1 - Тороидальная камера Токамака, 2 - граница плазмы, 3 - инжектор, 4 - атомная струя, 5 - исследуемый объем плазмы, 6 - коллиматор атомного анализатора, 7 - пятиканальный атомный анализатор, 8 - оптический монохроматор. Штрих-пунктирные линии - крайние положения оси анализатора

В течение первой фазы экспериментов по инжекции атомных струй в плазму Токамака-6 изучалось влияние работы инжектора на плазму. Сильное продольное магнитное поле Токамака препятствовало проникновению в плазму плазменного сгустка, сопровождающего поток атомов из инжектора. Эксперименты показали, что быстрая атомная струя из инжектора не оказывает влияния на устойчивость плазмы, ее концентрацию, проводимость и прочие измеряемые параметры плазмы. Лишь поток холодного газа из инжектора, приходящий в плазму спустя несколько сотен мксек после быстрой атомной струи, приводит к заметному увеличению концентрации плазмы, уменьшению проводимости плазменного шнура и иногда к неустойчивости типа "срыва" [1]. Все это, естественно, не мешает корректным измерениям в момент пролета быстрой атомной струи.

В течение основной фазы экспериментов в плазму Токамака-6 инжектировалась струя атомов водорода со средней энергией 30 ± 50 эв. Пятиканальный атомный анализатор регистрировал одновременно потоки атомов перезарядки при пяти различных энергиях. Это давало возможность за один импульс инжектора получать энергетическое распределение ионов плазмы в объеме 5 (рис. 1) по пяти точкам. Одновременно с атомами перезарядки измерялась испускаемая из этого же объема абсолютная интенсивность спектральной линии H_{β} , образующейся в результате возбуждения атомов струи электронами плазмы. Измеряемый свет проходил через коллиматор анализатора и при помощи призмы, расположенной в торце анализатора (рис. 1), направлялся в монохроматор 8. Осциллограммы интенсивности линии H_{β} и потока атомов пяти различных энергий, полученные за один импульс инжектора, показаны на рис. 2.

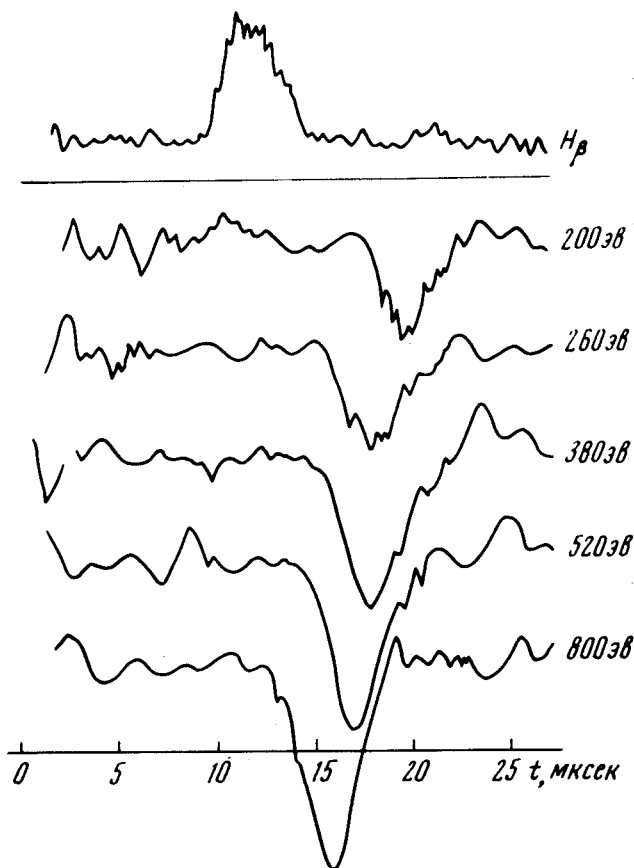


Рис. 2. Осциллограммы интенсивности линии H_{β} (вверху) и потока атомов перезарядки пяти различных энергий, полученные при пролете атомной струи сквозь плазму

Диаметр атомной струи в плазме на оси плазменного шнура был определен путем регистрации интенсивности линии H_{β} при смещениях оси коллиматора анализатора в экваториальной плоскости тороидальной камеры. Он оказался равным ~ 5 см, что обеспечивает достаточную локальность измерений. Значения абсолютной интенсивности H_{β} позволили при каждом импульсе инжектора оценивать концентрацию атомов в струе n_a в исследуемом объеме 5, составляющем в данных геометрических условиях $V \approx 10$ см³. Расчет величины n_a производился по

методу, описанному в работе [3] с учетом концентрации электронов плазмы на оси плазменного шнура n_e , измеряемой при помощи радиоинтерферометра. Оптические измерения показали, что концентрация атомов в объеме 5 при пролете струи сквозь плазму $n_a = (2 \div 4) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ¹⁾

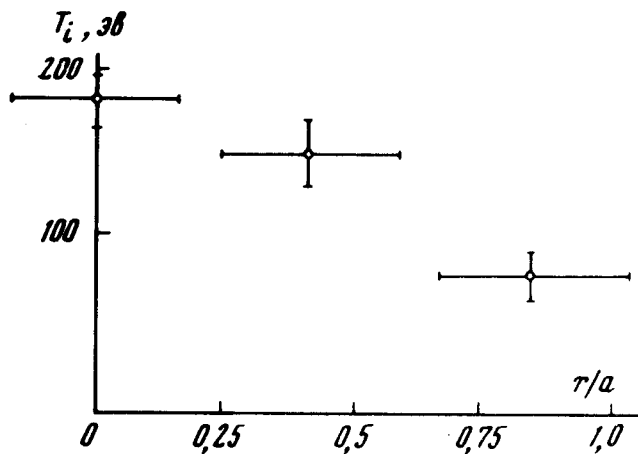


Рис. 3. Распределение ионной температуры по сечению плазменного шнура в Токамаке-6. r — расстояние от оси анализатора до оси плазменного шнура, a — радиус отверстия в диафрагме. Режим разряда: продольное магнитное поле — $8,7 \text{ кэ}$, ток разряда — 45 ка , средняя концентрация электронов $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $a = 14 \text{ см}$

Распределения атомов по энергии, испускаемых плазмой при ее взаимодействии с атомной струей, измерялись в диапазоне энергий $200 \div 800 \text{ эВ}$. В этом диапазоне они оказались максвелловскими с $KT \leq 200 \text{ эВ}$. К сожалению, области более низких энергий атомов, где должны располагаться максимумы максвелловских распределений, пока детально не изучены. Однако, сравнение расчетного потока атомов перезарядки из объема 5 с экспериментально зарегистрированным дает основания предполагать распределение по энергии ионов плазмы в этом объеме максвелловским во всем диапазоне энергий. Действительно, при таком предположении количество атомов перезарядки, попадающих в анализатор при пролете струи сквозь плазму, определяется выражением:

$$N = n_i n_a \langle \sigma v \rangle_{\Pi} V \frac{\omega}{4\pi} r. \quad (1)$$

Здесь n_i — концентрация ионов в объеме 5 (при расчетах принималось $n_i = n_e$), $\langle \sigma v \rangle_{\Pi}$ — усредненное по максвелловскому распределению произведение сечения резонансной перезарядки на скорость ионов, ω — телесный угол коллиматора анализатора. Рассчитанное по формуле (1) количество атомов при $n_i = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (радиоинтерферометрические измерения), $n_a = 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ (оптические измерения), $\langle \sigma v \rangle_{\Pi} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ сек}^{-1}$ (для $T = 200 \text{ эВ}$), $V = 10 \text{ см}^3$, $\omega = 3 \cdot 10^{-5} \text{ стерад}$, $r = 5 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$ составляет $N \approx 4 \cdot 10^6$ атомов/разряд.

¹⁾ Измерения интенсивности N_{β} и расчеты величин n_a в этих экспериментах производились В.М.Леоновым.

Эта величина хорошо совпадает с количеством атомов, регистрируемых анализатором с учетом экстраполяции максвелловского распределения атомов по всему диапазону энергий. Такое совпадение дает основания по измеренному энергетическому распределению атомов определять локальное значение ионной температуры T_i . На рис. 3 представлены величины T_i , полученные путем поворота оси анализатора вверх по направлению к инжектору и характеризующие распределение ионной температуры для верхней части сечения плазменного шнура. Заметим, что величина T_i на оси плазменного шнура хорошо совпала с ионной температурой, определенной по максвелловскому "хвосту" распределения по энергии атомов перезарядки, испускаемых плазмой Токамака-6 в отсутствие атомной струи [4].

Описанный здесь эксперимент носит предварительный характер и представляет собой, главным образом, демонстрацию возможностей новой методики измерения локальных параметров ионной компоненты плазмы. Такие эксперименты на Токамаках будут продолжены. Предполагается провести измерения энергетических распределений атомов перезарядки в более широком диапазоне энергий и более подробно исследовать распределение T_i по сечению плазменного шнура. Кроме того, можно надеяться, что достижение достаточной точности измерений абсолютного потока атомов перезарядки и абсолютной интенсивности линии H_{β} позволит по формуле (1) определять локальную концентрацию ионов n_i . В свою очередь сравнение локальных величин n_i и n_e даст возможность получить информацию о среднем заряде ионов плазмы, т. е. получить количественные представления о примесях в плазме.

Авторы благодарят Л.И.Крупник, П.А.Демченко за помощь в наладке инжектора.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
12 сентября 1973 г.

Литература

- [1] Н.Д.Виноградова и др. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Vienna, IAEA, 1971. Vol. 2, page 441.
- [2] Л.И.Крупник и др. Сб. "Исследования плазменных сгустков", Киев 1967 г. стр. 145.
- [3] Э.И.Кузнецов, Н.Д.Виноградова. Письма в ЖЭТФ, 8, 34, 1968.
- [4] В.В.Афросимов, М.П.Петров. ЖТФ, 37, 1995, 1967.