

ВРЕМЯ ЖИЗНИ ИОНОВ В УСТАНОВКЕ ТОКАМАК-3

Ч.А.Арцимович, Е.П.Горбунов, Ч.П.Петров

В замкнутых магнитных ловушках типа Токамак, где плазменный виток нагревается текущим по нему током и стабилизируется сильным продольным магнитным полем, важной характеристикой термоизоляции плазмы является среднее время сохранения тепловой энергии в ионной компоненте τ_{Ei} . Вводя эту величину, мы можем написать уравнение энергобаланса для ионов, отнесенное к единице объема, в следующем виде:

$$0,4 \cdot 10^{-17} \frac{n^2}{AT_i^{1/2}} = \frac{3}{2} nk \frac{dT_i}{dt} + \frac{3}{2} nk \frac{T_i}{\tau_{Ei}}, \quad (1)$$

где A – атомный вес вещества (водород или дейтерий), T_i – ионная температура в $^{\circ}\text{К}$, n – концентрация плазмы. Левый член уравнения представляет собой энергию, передаваемую от электронов к ионам за счет кулоновских столкновений за $сек$ в 1 см^3 . В этот член не входит величина электронной температуры T_e , так как поток тепла от электронов к ионам очень слабо зависит от T_e в пределах T_e/T_i ($1,6 + 10$). Отношение T_e/T_i в условиях эксперимента всегда находится в этом интервале. Уравнение (1) справедливо в том случае, если ионы нагреваются в основном за счет теплообмена с электронами при кулоновских столкновениях. Ряд экспериментальных фактов указывает на справедливость этого предположения в том случае, если концентрация плазмы не слишком мала (см., например, [1]).

На рисунке показано изменение величин T_i , n и τ_{Ei} во время разрядного импульса на установке Т-3 серии Токамак для центральной зоны плазменного шнуря. Величины τ_{Ei} расчитаны по уравнению (1), в которое подставлено значение температуры ионов, измеренной путем анализа энергетического спектра атомов перезарядки, и величина концентрации по радиоинтерферометрическим данным. Из выражения (1) следует, что в стационарном состоянии, т. е. в

$T_i^{3/2}$

тот интервал времени, когда температура близка к максимуму, $\tau_{Ei} \approx 50 A \frac{T_i^{3/2}}{n}$.

Отсюда, в частности, следует, что отношение τ_{Ei} к среднему интервалу времени между двумя кулоновскими ион-ионными столкновениями для данного сорта ионов есть постоянная величина, независящая от T_i и n .

Потери тепловой энергии из ионной компоненты плазмы вызываются:
1) теплопроводностью, 2) диффузией, 3) перезарядкой ионов на остаточном газе. Следовательно:

$$\frac{1}{\tau_{Ei}} = \frac{1}{\tau_T} + \frac{1}{\tau_D} + \frac{1}{\tau_\Pi}, \quad (2)$$

где τ_T – время сохранения энергии, обусловленное теплопроводностью, τ_D – диффузионное время жизни (или время жизни заряженных частиц), τ_Π – время жизни ионов относительно перезарядки. Сравнение времен входящих в соотношение (2), характеризует вклад трех перечисленных выше процессов в потери

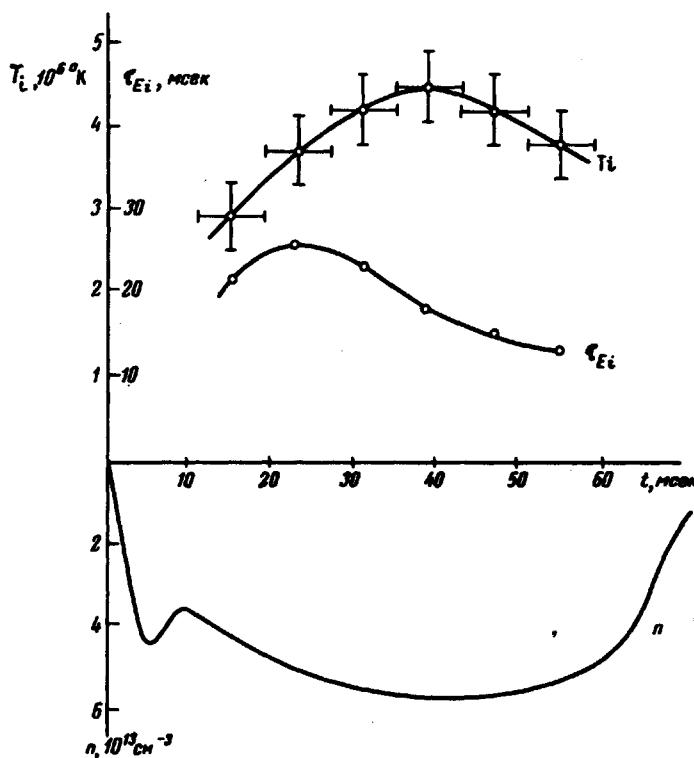
тепла ионами. Величины τ_{Π} и τ_D определяются следующими выражениями

$$\tau_{\Pi} = \frac{1}{n_a \langle \sigma v \rangle_{\Pi}}, \quad (3)$$

$$\frac{dn}{dt} = n n_a \langle \sigma v \rangle_i - \frac{n}{\tau_D} \quad (\text{для чисто водородной плазмы})$$

$$\text{В стационарном случае } \tau_D = \frac{1}{n_a \langle \sigma v \rangle_i} \quad (4)$$

В этих выражениях n_a — плотность атомов водорода илидейтерия в приосевой области плазмы, $\langle \sigma v \rangle_{\Pi}$ и $\langle \sigma v \rangle_i$ — усредненные по максвелловскому распределению скоростей произведения сечений резонансной перезарядки и ионизации атомов электронами на скорости ионов и электронов соответственно.



Ионная температура T_i , энергетическое время жизни ионов τ_{Ei} и концентрация плазмы n в зависимости от времени в Токамаке-1 (все параметры относятся к приосевой области плазмы). Режим разряда: дейтерий, ток разряда 120 ka , продольное магнитное поле 36 $k\varphi$.

Входящая в выражения (3) и (4) величина n_a измерялась на установке Токамак ТМ-3 методом регистрации абсолютной интенсивности бальмеровских линий водорода [2]. На установке Т-3 такие измерения не проводились; однако

здесь существует возможность оценить величину n_a по абсолютному потоку атомов перезарядки, испускаемому приосевой областью плазмы. Действительно, поток атомов перезарядки, изотропно излучаемый с 1 см² поверхности плазменного цилиндра с радиусом a_0 , равен:

$$I_0 = \frac{1}{2} n n_a < \sigma v >_{\text{II}} a_0 \quad . \quad (5)$$

Энергетическое распределение атомов перезарядки $\frac{dn_0}{dE}$, излучаемых внутренними областями плазмы, может быть получено с помощью атомного анализатора в абсолютном масштабе в диапазоне энергии от 500 + 700 эВ до нескольких эВ. Оно имеет максвелловскую форму с температурой T_0 , близкой к максимальной ионной температуре плазмы и равной для типичных условий опытов 300 + 400 эВ для дейтерия и 500 эВ для водорода. Экстраполяция такого распределения до нулевой энергии по Максвеллу, интегрирование его по формуле $\int_0^\infty \frac{dn_0}{dE} v dE$ и

учет геометрии входного коллиматора атомного анализатора позволяет определить величину потока I_0 . Что касается величины a_0 , то она представляется собой радиус той зоны приосевой области плазмы, которая излучает измеряемый экспериментально поток атомов I_0 . Величина a_0 , следовательно, определяется тем, что внутри зоны такого радиуса ионная температура плазмы должна быть близка к максимальной. Проведенные недавно на Т-3 измерения распределения температуры плазмы по сечению плазменного витка с помощью томсоновского рассеяния света на электронах показали, что заметный спад температуры имеет место на расстояниях более 10 см от оси витка [3]. На более близких расстояниях от оси температура спадает к периферии менее, чем на 10%. Этот факт дает нам основания принять для оценочных расчетов величину n_a по формуле (5) $a_0 \approx 10 \text{ см}$.

Полученные таким способом величины n_a для типичных режимов Т-3 в период времени, когда $\frac{dT_i}{dt} = 0$, лежат в диапазоне $n_a \approx (1,5 + 3) \cdot 10^8 \text{ атомов/см}^3$.

Заметим, что для установки ТМ-3 подобного рода расчеты дают величину $n_a \sim 10^9 \text{ атомов/см}^3$, которая находится в удовлетворительном согласии с соответствующими величинами, полученными спектроскопическим путем. Используя значения $< \sigma v >_i = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{сек}$ (для $T_i = 1000 \text{ эВ}$) и $< \sigma v >_{\text{II}} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{сек}$ (для $T_{\text{дейтонов}} = 300 + 400 \text{ эВ}$) получаем по формуле (3) и (4) величины r_D в диапазоне (0,22 + 0,45) сек и r_{II} в диапазоне (0,085 + 0,17) сек. Сравнение этих величин со значением r_E , которое вблизи максимума T_i равно ~17 сек, показывает, что на долю диффузии и перезарядки в приосевых областях плазменного шнура в установке Т-3 приходится не более 20% общих тепловых потерь и что основная часть тепла теряется ионами за счет теплопроводности.

Поступила в редакцию
Литература 15 июня 1970 г.

[1] Л.А.Арцимович и др. Письма в ЖЭТФ, 10, 130, 1969.

[2] Э.И.Кузнецов, Н.Д.Виноградова. Письма в ЖЭТФ, 8, 59, 1968.

[3] N.J.Peacock et al. Nature, 224, 488, 1969.