

находятся стационарные распределения $f(X, a)$; 3) По уравнению (10) определяется функция $D(\Delta a)$. Тем самым находится перенормированное распределение f_0 ; 4) По формуле (8) или (6) определяется разность энтропий $\tilde{S} - S$ при любых выбранных значениях $a = a_0$, $a = a_0 + \Delta a$.

Если $\tilde{S}_0 > S$, то выбор управляющих параметров a сделан правильно, и при переходе от состояния со значением $a = a_0$ к состоянию со значением $a = a_0 + \Delta a$ степень упорядоченности возрастает и происходит процесс самоорганизации.

В противном случае для нахождения более упорядоченных состояний надо изменить выбор управляющих параметров.

При наличии нескольких управляющих параметров по рассмотренному критерию возможен поиск наиболее упорядоченного состояния в пространстве управляющих параметров. Это может быть сделано, как уже отмечалось, по экспериментальным данным без использования математической модели системы.

Л и т е р а т у р а

- [1] К л и м о н т о в и ч Ю.Л. Уменьшение энтропии в процессе самоорганизации. - Письма в ЖТФ, 1983, т. 9, с. 1089.
- [2] К л и м о н т о в и ч Ю.Л. Энтропия и производство энтропии при ламинарном и турбулентном течениях. - Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, с. 80.
- [3] E b e l i n g W., K l i m o n t o v i c h Yu.L. Selforganization and Turbulence in Liquids. - Leipzig, Teubner, 1984.
- [4] K l i m o n t o v i c h Yu.L. - Z. Phys. B 1987, v. 66, p. 125.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию
10 февраля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 24

26 декабря 1988 г.

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ БЫСТРЫХ ИОНОВ ПРИ НИЖНЕГИБРИДНОМ НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ ФТ-2

В.Н. Б у д н и к о в, Л.А. Е с и п о в,
М.А. И р з а к

В экспериментах по нижнегибридному (НГ) нагреву плазмы в токамаках функция распределения ионов по энергиям, определяемая обычно по спектру нейтралей перезарядки, имеет вид двойного максвелловского распределения [1]. Крутая низкоэнергичная часть рас-

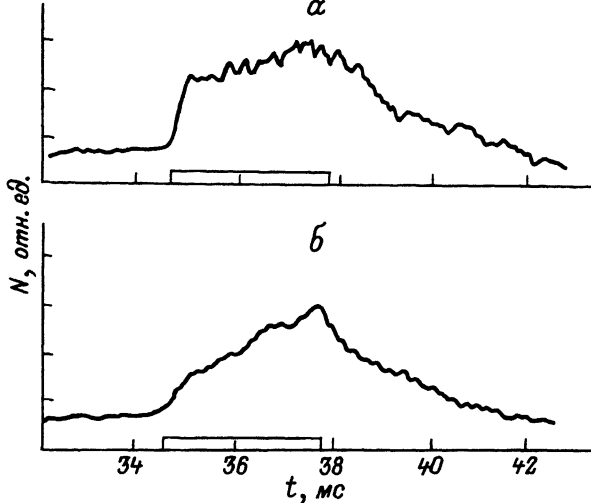


Рис. 1. Осциллограммы потоков нейтралей перезарядки. а - $E = 975$ эВ, в - $E = 950$ эВ. \square - импульс ВЧ.

пределения определяет температуру основной массы ионов в центре T_{i0} , а более высокоэнергичная („хвост“) соответствует быстрым надтепловым ионам, генерируемым волной. Анализ динамики потоков нейтралей перезарядки на токамаке ФТ-2 [2] во время действия ВЧ импульса на частоте $f_0 = 925$ МГц, соответствующей для параметров разряда НГ диапазону частот, позволил получить интересную информацию о взаимодействии греющей волны с ионами плазмы.

Оказалось, что наблюдаются два резко отличающихся вида временных зависимостей потоков - один с резким фронтом в начале ВЧ импульса (несколько сотен микросекунд) и второй с плавным нарастанием за времена масштаба нескольких миллисекунд. Первый вид зависимостей наблюдается при больших энергиях, относящихся к „хвосту“ функции распределения, второй - при малых энергиях, характерных для основной части функции распределения. Резкий рост потоков нейтралей перезарядки большой энергии отражает, как можно думать, тот факт, что ионы больших энергий непосредственно генерируются волной, а плавный рост при малых энергиях свидетельствует о том, что ионы низких энергий непосредственно не генерируются, а возникают в результате передачи энергии от быстрых ионов столкновительным путем. Переход от плавного к резкому режиму генерации при постоянной энергии ионов E_i происходит при изменении параметров плазмы или ВЧ мощности $P_{ВЧ}$. Однако наиболее наглядно факт резкого перехода был продемонстрирован в опыте с фиксированными параметрами разряда и мощностью (концентрация $\bar{n}_e = 2.4 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$, тороидальное поле $B = 24$ кГс ток разряда $I_p = 3$ кА, $P_{ВЧ} = 80$ кВт) при плавном изменении ана-

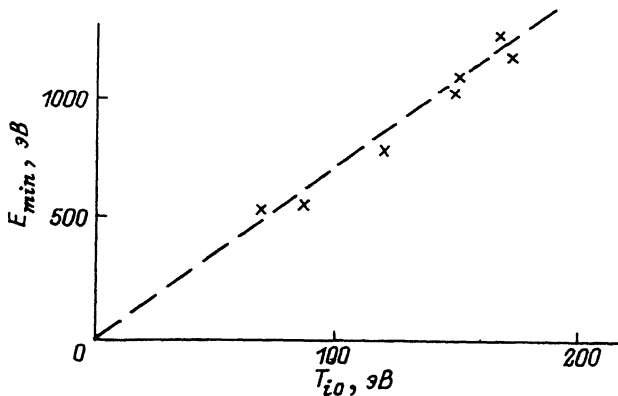


Рис. 2. Зависимость минимальной энергии генерируемых ионов от ионной температуры плазмы.

лизирующей энергии анализатора атомных частиц E_i . Из рис. 1 видно, что переход от плавного шумового нарастания тока к резкому (скачку) происходит при увеличении энергии E_i всего на 2.5%. Таким образом, величина минимальной энергии ионов E_{min} , которые могут генерироваться при определенных параметрах разряда, является вполне определенной величиной и, как можно думать, отражает каким-то образом характер взаимодействия волны с ионами плазмы. По существующим представлениям, поглощение энергии НГ волн связано с так называемым стохастическим механизмом. При этом ускорение ионов в направлении, перпендикулярном тороидальному магнитному полю, тесно связано с фазовым резонансом иона в поле замедленной волны с показателем преломления $N_{\perp} \sigma_{i\perp} \approx \frac{c}{N_{\perp}} = v_{\phi\perp}$ [1].

Таким образом, по энергии генерируемых ионов $E_{i\perp}$ можно сделать вывод о существовании волн с замедлением $N_{\perp} = c \sqrt{\frac{m_i}{2E_{i\perp}}}$.

Естественно, минимальная энергия генерируемых ионов E_{min} определяет максимальное замедление волны N_{\perp} в условиях опыта.

На рис. 2 приведена зависимость E_{min} от T_{io} при мощности нагрева 30 кВт. Заметим, что в плазме токамака различные параметры являются взаимосвязанными, например $T_{io} \sim (I_p B \bar{n}_e)^{1/3}$. Данные, приведенные на рис. 2, получены в разрядах с существенно различными I_p, B, \bar{n}_e . Однако, как видно, экспериментальные точки группируются вблизи одной прямой, что свидетельствует о том, что температура ионов является существенным параметром, определяющим E_{min} . Наклон линии, проведенной через экспериментальные

точки, дает отношение $S_i = \left(\frac{E_{min}}{T_{io}}\right)^{1/2} = \frac{v_{\phi\perp}}{v_{Ti}} \approx 2.75$. По тео-

при стохастического нагрева предсказывается близкая к этой, полученной в эксперименте, величина $\delta_i \approx 2\sqrt{2}$ для эффективного поглощения НГ волн и генерации ионов. Казалось бы, что приведенную на рис. 2 зависимость можно рассматривать как подтверждение теории стохастического нагрева ионов НГ волнами, замедленными в окрестности точки линейной трансформации косоу ленгмюровской волны, возбуждаемой антенной в плазме, в теплую плазменную моду. В связи с этим следует обратить внимание на то, что левые точки на рис. 2 ($T_{i0} < 100$ эВ) получены в эксперименте с магнитным полем $B = 12-13$ кГс и концентрацией $\bar{n}_e = 1.5 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$, когда заведомо для волны на частоте $f_0 = 925$ МГц отсутствует область линейной трансформации. Поэтому в этих условиях стохастического нагрева в обычно понимаемом смысле [1] быть не может. Полученная экспериментально зависимость на рис. 2 отражает тот факт, что соотношение $v_{\varphi\perp} \approx 2.7 v_{Ti}$ является условием эффективного поглощения замедленных волн замагниченными ионами независимо от механизма замедления и сдвоя фазы волн. Это может иметь место, например, при генерации замедленных волн за счет параметрических неустойчивостей, которые могут легко возбуждаться в НГ диапазоне частот [3]. Условие $\frac{\omega}{k_{\perp}} = v_{\varphi\perp} = 2.7 \cdot v_{Ti}$ является универсальным в том смысле, что определяет верхнюю границу волновых чисел волн, которые могут возбуждаться в плазме при каких-то процессах. Более коротковолновые колебания просто не раскачиваются из-за сильного затухания.

Проявление зависимости $v_{\varphi\perp} \approx 2.7 v_{Ti}$ в эксперименте позволяет, с другой стороны, считать, что факт резкого роста потоков нейтралей перезарядки с $E > E_{min}$ действительно отражает существование в плазме замедленных волн с соответствующими поперечными замедлениями $n_{\perp} < N_{Lmax}$; это может быть использовано при исследовании механизма поглощения НГ волн в плазме токамака.

Л и т е р а т у р а

- [1] Г о л а н т В.Е., Ф е д о р о в В.И. Высоочастотные методы нагрева плазмы в тороидальных термоядерных установках. М.: Энергоатомиздат, 1986, с. 69-96, 116-141.
- [2] Б у д н и к о в В.Н. и др. - Физика плазмы, 1984, т. 10, в. 2, с. 485-492.
- [3] Р о р к о л а б М. - Phys. Fluids., 1974, v. 17, p. 1432-1442; Phys. Fluids., 1977, v. 20, p. 2058-2075.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
17 мая 1988 г.