

НАГРЕВ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ БЕСТОКОВОЙ ПЛАЗМЫ АЛЬФВЕНОВСКИМИ ВОЛНАМИ В СТЕЛЛАРАТОРЕ "УРАГАН"-2"

*О.М.Швец, С.С.Калиниченко, А.И.Лысован,
Н.И.Назаров, А.С.Славный, К.Н.Степанов,*

В.Ф.Тарасенко

В условиях ионного циклотронного резонанса осуществлен нагрев водородно-дейтериевой плазмы. Обнаружен эффект аномально быстрого нагрева нерезонансного ионного компонента. Показана возможность создания и нагрева плотной ($\geq 10^{13}$ см $^{-3}$) бестоковой плазмы при совместной работе двух ВЧ генераторов на разных частотах.

Ионный циклотронный резонанс (ИЦР) в плазме, содержащей ионы двух сортов, является одним из наиболее перспективных методов нагрева плазмы в крупных тороидальных ловушках. Идея этого метода нагрева заключается в использовании линейного бесстолкновительного механизма передачи энергии от высокочастотного (ВЧ) поля малой группе резонансных ионов и последующем нагреве основного (нерезонансного) компонента от резонансного за счет кулоновских столкновений [1].

В настоящей работе сообщается об обнаружении аномально быстрого (бесстолкновительного) нагрева водородной плазмы, содержащей небольшую (до 10%) добавку ионов дейтерия, при помощи альфвеновских (ионных циклотронных) волн в условиях ИЦР либо для ионов дейтерия ($\omega \approx \omega_{сД}$), либо для ионов водорода ($\omega \approx \omega_{сН}$). Эксперименты выполнены на стеллараторе-рейстреке "Ураган-2" [2] ($\bar{a} \approx 7$ см, $R = 110$ см, $L = 1035$ см, $l = 3$, $H_0 \sim 20$ кЭ, $\epsilon \sim 0,9$).

В первой серии экспериментов ВЧ мощность ($P_{ВЧ} \approx 300$ кВт, $f \approx 10$ МГц) подводилась к возбуждающему устройству (антенне) рамочного типа с широким спектром продольных волновых гармоник излучаемого ВЧ поля ($\lambda_z \approx 10^2 + 10^3$ см). В режимах резонансного возбуждения альфвеновских волн (АВ) создавалась плазма плотностью $\bar{n}_e \sim (4 + 10) \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$ в широком диапазоне изменения напряженности продольного магнитного поля, включающем области ИЦР как для ионов водорода, так и дейтерия: $\Omega_H = \omega / \omega_{сН} = 0,4 + 1$. Существенный нагрев ионов плазмы наблюдался при напряженностях магнитного поля $H_0 \approx 7$ кЭ и $H_0 \approx 13$ кЭ, близких к циклотронным значениям для протонов и дейтронов (рис. 1). Энергетические спектры ионов водорода и дейтерия, измеренные по перезарядке нейтралов в областях ИЦР для обоих сортов ионов, сильно отличались от максвелловских (рис. 2). Характерной особенностью энергетических спектров дейтронов при нагреве в резонансе $\omega \approx \omega_{сД}$ являлось наличие более высокоэнергичного "хвоста" по сравнению с энергетическим спектром протонов. Однако изучение временной зависимости энергетических спектров показало, что средняя энергия протонов $T_{\text{пн}}$ превышала среднюю энергию дейтронов $T_{\text{дп}}$ практически в течение всего времени нагрева плазмы как при ИЦР для водорода, так и дейтерия (рис. 1). Типичные значения средней энергии ионных компонентов

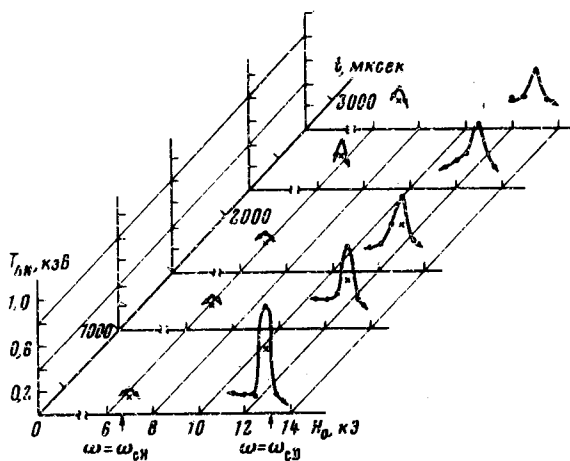


Рис. 1. Зависимость средней энергии ионов водорода $T_{\perp H}$ (○) и дейтерия $T_{\perp D}$ (×) от величины продольного магнитного поля H_0 в течение ВЧ импульса ($\tau_{ВЧ} = 4,3$ мсек)

и плотности создававшейся плазмы (измеренной интерферометром на длине волны $\lambda = 8$ мм) равны: при ИЦР $\omega \approx \omega_{сД}$, $T_{\perp H} \sim 1$ кэВ для $\bar{n}_e \sim 10^{12}$ см $^{-3}$; при ИЦР $\omega \approx \omega_{сН}$, $T_{\perp H} \sim 400$ эВ, $T_{\perp D} \sim 300$ эВ для $\bar{n}_e \sim 2 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$. Нагрев ионов водорода при ИЦР для дейтерия осуществлялся в течение времени $t < 0,1$ мсек, что намного меньше времени кулоновского обмена энергией между ионами дейтерия и водорода ($\tau_{Д-Н} \sim 4$ мсек при $n_e \sim n_H \sim 4 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$ и $T_D \gtrsim 300$ эВ). В условиях экспериментов амплитуда поля волны в плазме в области обоих ИЦР составляла величину $\bar{H}_2 \sim 15$ Э. При таких напряженностях ВЧ полей в плазме направленная скорость дейтронов в области их циклотронного резонанса $u_{\perp} = k_{\perp} c \bar{H}_2 / 4 \pi n_D e \sim 5 \cdot 10^7$ см/сек превышала тепловую скорость ионов плазмы v_{Ti} . В этих условиях в плазме возникают мелко-масштабные неустойчивости пучкового типа, обусловленные относительными осцилляциями либо ионов разных сортов, либо ионов и электронов. Эти неустойчивости имеют характерный инкремент нарастания γ и частоту ω порядка плазменной ионной ω_{pi} , а длины волн $\lambda_{\perp} \sim u_{\perp} / \omega_{pi}$ [3, 4]. При $u_{\perp} \lesssim v_{Ti}$ возбуждаются параметрические ионно-циклотронные неустойчивости ($\omega \sim n \omega_{ei}$, $\lambda_{\perp} \sim u_{\perp} / \omega_{ei}$) [5, 6]. Рассеяние частиц плазмы на турбулентных пульсациях электрического поля, возникающих вследствие развития этих неустойчивостей плазмы в поле АВ приведет к быстрому турбулентному нагреву плазмы со скоростью, определяемой уровнем турбулентности. Уровень турбулентности особенно велик в случае развития ион-ионных неустойчивостей. Наблюдаемый anomalно быстрый нагрев обоих ионных компонентов плазмы может быть связан как с черенковским и циклотронным поглощением и испусканием плазмонов, так и (в режимах сильной турбулентности) с конечным временем корреляции неустойчивых колебаний — "стохастическим" нагревом.

Во второй серии экспериментов исследовался нагрев плотной ($\bar{n}_e \gtrsim 10^{13}$ см $^{-3}$) бестоковой плазмы при совместной работе двух ВЧ генераторов на разных частотах. Первый ВЧ генератор, согласованный на антенну рамочного типа ($f_1 \approx 10$ МГц, $P_1 \sim 300$ кВт), использовался для создания исходной плазмы в режимах возбуждения АВ ($H_0 \approx 15$ кЭ, $\Omega_{1H} \approx 0,44$). Для нагрева этой плазмы применялся второй ВЧ генератор

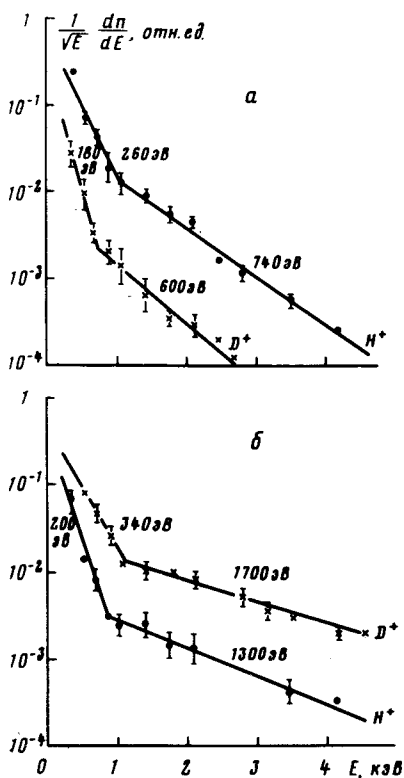


Рис. 2. Энергетические спектры протонов и дейтронов, измеренные в условиях ИЦР: *a* — $H_0 = 7$ кЭ, $t = 2,0$ мсек; *б* — $H_0 = 13$ кЭ, $t = 0,1$ мсек

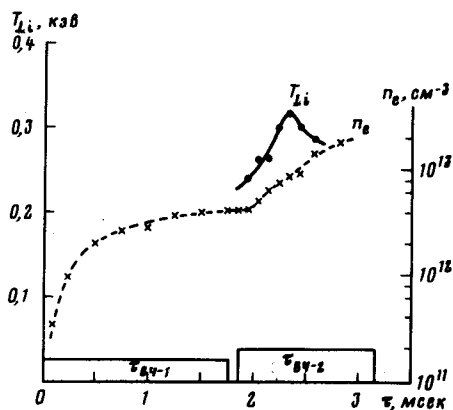


Рис. 3. Временные зависимости плотности создававшейся плазмы \bar{n}_e и температуры ионов водорода $T_{\perp H}$ при работе двух ВЧ генераторов

($f_2 \approx 20$ МГц, $P_2 \sim 1$ МВт). Ввод в плазму ВЧ мощности от этого генератора осуществлялся в режимах возбуждения ионных циклотронных волн ($\Omega_{2H} \approx 0,83$) с помощью антенны шелевого типа с сосредоточенным спектром гармоник излучаемого ВЧ поля ($\lambda_z \approx 30 + 80$ см). Использование двух ВЧ генераторов позволило при циклотронном резонансе на ионах водорода получить бестоковую плазму с параметрами: $T_{\perp H} \approx 330$ эВ, $\bar{n}_e \gtrsim 10^{13}$ см $^{-3}$. В этом случае функция распределения протонов по энергиям оставалась близкой к максвелловской в течение всего времени нагрева (не было "хвостов"). Однако эффективный нагрев плазмы с помощью второго генератора наблюдался при включении его только после окончания импульса первого генератора, когда ВЧ импульсы обоих генераторов не перекрывались (рис. 3). При перекрытии ВЧ импульсов во времени эффективность нагрева вторым генератором существенно уменьшалась. Выяснение причины этого явления требует дополнительных экспериментов.

Авторы благодарят персонал стелларатора "Ураган-2" и ВЧ комплексов за техническое обеспечение экспериментов и помощь в работе.

Физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
8 сентября 1981 г.

Литература

- [1] *Аликаев В.В.* В сб. Итоги науки и техники. Физика плазмы. М.: ВИНТИ, 1981, т.1, часть 2, стр. 80.
 - [2] *Амелин В.З. и др.* УФЖ, 1976, 21, 422.
 - [3] *Grigoreva L.I. et al.* 4-th Int. Conf. on Plasma Physics and CNFR. IAEA, III, 573, 1971.
 - [4] *Сизоненко В.Л., Степанов К.Н.* Письма в ЖЭТФ, 1968, 8, 592.
 - [5] *Киценко А.Б. и др.* ЖТФ, 1973, 43, 1425, 1437.
 - [6] *Киценко А.Б., Степанов К.Н.* ЖЭТФ, 1975, 64, 1606.
-