

04

Эффект узколокализованного повышенного испарения углеродных макрочастиц в стеллараторе Wendelstein 7-AS

© В.М. Тимохин, Б.В. Кутеев, В.Ю. Сергеев,
В.Г. Скоков, R. Burhenn

С.-Петербургский государственный политехнический университет
Max Planck Institut für Plasmaphysik, EURATOM Ass.,
Wendelsteinstrasse 1, 17491 Greifswald, Germany

Поступило в Редакцию 9 сентября 2003 г.

На стеллараторе Wendelstein 7-AS при нагреве плазмы на 2-й гармонике электронно-циклотронного резонанса обнаружен новый режим испарения углеродных макрочастиц, при котором на профиле скорости испарения наблюдались резкие пики с характерной шириной несколько миллиметров. Пики наблюдались в периферийной части плазменного шнура при центральной электронной плотности ниже или мощностью нагрева выше пороговых значений. Появление пиков коррелирует с наблюдением надтеплого излучения в низкочастотной части спектра электронно-циклотронного излучения. Эффект связывается с генерацией надтепловых электронов электронно-циклотронным излучением гиروتронов. Сделанные оценки дают значения для энергии и плотности популяции надтепловых электронов 30–50 keV и 10^{11} – 10^9 cm⁻³ соответственно.

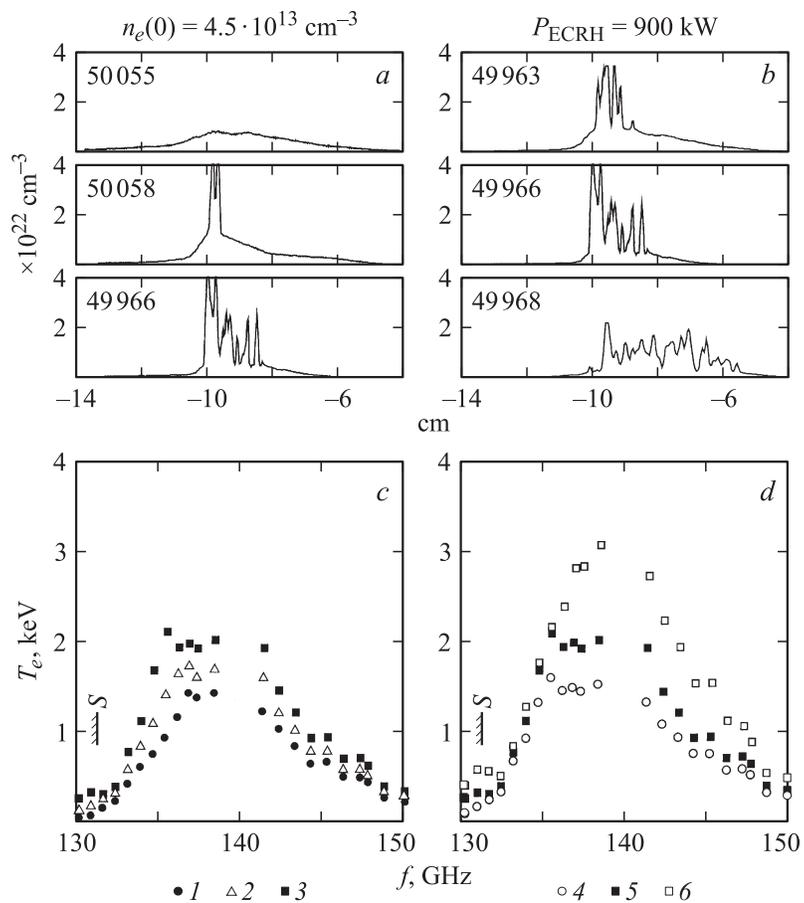
Надтепловые электроны могут оказывать заметное влияние на свойства высокотемпературной плазмы в токамаках и стеллараторах [1,2]. Появление групп таких электронов в плазме стелларатора Wendelstein 7-AS (W7-AS) было зарегистрировано с помощью приемника электронно-циклотронного излучения (ЭЦИ) в режимах с мощным (~ 1 MW) СВЧ-нагревом на гармониках электронно-циклотронного резонанса (ЭЦРН) и малой плотностью плазмы ($\sim 10^{13}$ cm⁻³) [2,3]. Исследования испарения углеродных макрочастиц в таких режимах (см. [4,5]) выявили наличие зон повышенного испарения сантиметрового масштаба, расположенных в периферийной части плазменного шнура. Данный эффект связывался с увеличением потока энергии на

поверхность макрочастицы за счет популяции надтепловых электронов. В данной работе описывается качественно новый режим испарения, характеризующийся резкими всплесками излучения на пространственных масштабах порядка нескольких миллиметров, и предлагается механизм, объясняющий их появление.

В экспериментах сферические углеродные макрочастицы диаметром 0.40 ± 0.01 mm ускорялись до скоростей 150–350 m/s в направлении центра плазмы с помощью инжектора ДИМ-6 [6]. Испарение пеллет наблюдалось с двух направлений с помощью ССD-камер и широкообзорного фотодиода. Через интерференционные светофильтры 720 ± 5 nm регистрировалось излучение доминирующей линии СII. Скорость испарения определялась по излучению линии СII, в предположении их пропорциональности [7]. Подробно схема эксперимента описана в [5,7].

Типичные радиальные профили скорости испарения вдоль траектории пеллеты (см. [7]), полученные при различных концентрациях плазмы и мощностях ЭЦРН, представлены на рисунке, *a* и *b* соответственно. Координата вдоль траектории пеллеты отсчитывается от центра вакуумной камеры установки; положительным считается направление к центру установки. Пеллета пересекает сепаратрису в области — 16–14 см вдоль траектории в зависимости от параметров разряда и инжекции. Из рисунка, *a* видно, что для центральной электронной плотности $n_e(0) = 4.5 \cdot 10^{13}$ см⁻³ при мощности ЭЦРН $P_{\text{ECRH}} = 400$ kW (импульс 50055) профиль скорости испарения \dot{N} гладкий. При повышении P_{ECRH} до 700 kW (импульс 50058) в периферийной области появляется характерная зона узколокализованного повышенного испарения (УЛПИ). В ней можно выделить два узких (шириной ~ 0.1 см) пика с величиной скорости испарения, более чем в 5 раз превосходящей средние значения \dot{N} в гладкой части. При увеличении P_{ECRH} до 900 kW (импульс 49966) зона существования УЛПИ расширяется до 2 см, а число пиков в ней возрастает до 7.

На рисунке, *b* представлены профили $\dot{N}(r)$ для пеллет, испаряющихся в плазме с $P_{\text{ECRH}} = 900$ kW при $n_e(0) = (1.8, 4.5, 6.0) \cdot 10^{13}$ см⁻³. Видно, что с уменьшением плотности разряда зона повышенного испарения расширяется, а количество пиков увеличивается. Порог исчезновения зон узколокализованного повышенного испарения по плотности для этой мощности лежит выше значения $6.0 \cdot 10^{13}$ см⁻³, которое было максимальным в описываемых экспериментах. Таким образом, УЛПИ наблюдается во всех разрядах этой серии.



Профили скорости испарения углеродных пеллет (*a, b*) и соответствующие спектры ЭЦИ (*c, d*) для разрядов с одинаковыми плотностью (*a, c*) и мощностью (*b, d*). *S* — положение сепаратрисы, 1 — 50055 ($P_{\text{ECRH}} = 400 \text{ kW}$), 2 — 50058 ($P_{\text{ECRH}} = 700 \text{ kW}$), 3 — 49966 ($P_{\text{ECRH}} = 900 \text{ kW}$), 4 — 49963 ($n_e = 6.0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), 5 — 49966 ($n_e = 4.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), 6 — 49968 ($n_e = 1.8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$).

На рисунке, c и d показаны спектры ЭЦИ тех же разрядов, для которых на рисунке, a и b изображены профили скорости испарения $\dot{N}(r)$. Из них видно, что с ростом P_{ECRH} и уменьшением $n_e(0)$ растет излучение в частотном диапазоне 130–133 GHz, который соответствует области ЭЦР, лежащей за сепаратрисой плазменного шнура. Это излучение связывают с генерацией надтепловых электронов [2,3]. Надтепловые электроны генерируются в сечении ввода мощности ЭЦР и распространяются по всей магнитной поверхности, частично термализуясь за счет столкновений. Таким образом, они попадают в сечение инжекции на внешнюю сторону тора, где они и вызывают наблюдаемые эффекты на кривой $\dot{N}(r)$. Таким образом, пеллета как бы „подсвечивает“ группы надтепловых электронов, тем самым позволяя определить их точную локализацию в плазме, что невозможно сделать с помощью ЭЦИ диагностик.

Зная положение пиков на профиле $\dot{N}(r)$ и предполагая, что низкочастотная часть спектра ЭЦИ вызвана излучением надтепловых электронов, можно оценить их энергию по релятивистскому смещению частоты излучения надтепловых электронов в сторону низких частот. Такие оценки дают значения их энергии $E_{st} \sim 3\text{--}20\text{ keV}$. По измеренным соотношениям скорости испарения в пике и вне пика можно оценить соотношение потоков энергии на поверхность пеллеты от тепловых и надтепловых электронов. Отсюда по известной их энергии E_{st} можно оценить плотности популяции $n_{st} \propto n_e (T_e/E_{st})^{3/2}$ (здесь n_e , T_e — электронная плотность и температура фоновой плазмы). Чтобы вызвать наблюдаемые эффекты на профиле $\dot{N}(r)$, значения плотности надтепловых электронов оцениваются в пределах $n_{st} \sim 10^{11}\text{--}10^{12}\text{ cm}^{-3}$. Это составляет от 1% (для $E_{st} = 20\text{ keV}$) до 10% (для $E_{st} = 3\text{ keV}$) от концентрации фоновой плазмы.

Другая оценка может быть сделана в предположении, что надтепловые электроны генерируются в сечении ввода ЭЦР мощности со стороны сильного поля на тех же магнитных поверхностях, на которых в сечении инжекции наблюдаются пики на профиле $\dot{N}(r)$. Согласно расчетам магнитной конфигурации W7-AS, зона этих магнитных поверхностей отстоит на расстояние $\sim 10\text{ cm}$ от магнитной оси в область сильного поля. Из условия резонанса в этой области с учетом релятивистского сдвига массы $\omega_{ce} = eB/m_0c\gamma = 140\text{ GHz}$ можно оценить энергию популяции надтепловых электронов как $\sim 30\text{--}50\text{ keV}$. Здесь e — заряд электрона, B — величина магнитного поля в зоне

генерации надтепловых электронов, m_0 — масса покоя электрона, c — скорость света, γ — релятивистский фактор. В этом случае значения плотности уменьшаются до величин $n_{st} \sim 10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, что составляет 0.001–1% от концентрации фоновой плазмы.

Таким образом, в режимах с ЭЦРН обнаружено узлокализованное повышенное испарение углеродных макрочастиц в плазме стелларатора Wendelstein 7-AS. Поведение зон УЛПИ в зависимости от параметров плазмы, а также их корреляция с поведением низкочастотной части спектров сигналов ЭЦИ свидетельствуют в пользу того, что причиной их возникновения являются надтепловые электроны. Оценки по релятивистскому сдвигу частоты показывают, что наблюдаемые эффекты могут создаваться популяцией надтепловых электронов с энергией около 30–50 keV и плотностью $10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. Спектры ЭЦИ и положение пиков на кривой $\dot{N}(r)$ могут свидетельствовать о наличии в плазме электронов с энергиями 3–20 keV в режимах УЛПИ. Представляется необходимым произвести дополнительные измерения в низкочастотной части спектра ЭЦИ (до 120 GHz), где должны излучать электроны с энергиями порядка 50 keV.

Авторы выражают признательность сотрудникам стелларатора Wendelstein 7-AS, содействовавшим выполнению работы.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 02–02–17555-а.

Список литературы

- [1] Parail V.V., Pogutse O.P. // Review of plasma phys. New York, 1986. V. 11. P. 1.
- [2] Rome M. et al. // Plasma Phys. Control Fusion. 1997. V. 39. P. 117–158.
- [3] Hase M., Pernreiter W., Hartfujfl H.J. // J. Plas. Fusion Research Series. 1998. V. 1. P. 99.
- [4] Egorov S.M. et al. // Nucl. Fusion. 1992. V. 32. N 11. P. 2025.
- [5] Ledl L. et al. // Europhysics Conf. Abstracts. 1999. Maastricht. V. 23J. P. 1477–1480.
- [6] Lang P.T. et al. // Rev. Sci. Instrum. July 1994. V. 65 (7). P. 2316.
- [7] Ledl L. Dissertation. IPP-Report III/257, Februar 2000.