УДК 533.9,621.039.616

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНОСА ЧАСТИЦ ИЗ ЦЕНТРА ПЛАЗМЫ ПОСЛЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЭЦР-НАГРЕВА В ТОКАМАКЕ Т-10

Н.В. Касьянова, В.Ф. Андреев

Институт физики токамаков Курчатовского центра ядерных технологий НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Исследование переноса частиц при ЭЦР-нагреве имеет важное значение для будущего токамака-реактора ИТЭР, так как определяющий вклад тепла в реакторе будут давать α -частицы, при этом тепловыделение будет происходить в центре плазмы. Эксперименты на установках токамак и стелларатор показали, что после включения центрального ЭЦР-нагрева возникает дополнительный (как диффузионный, так и конвективный) вынос частиц из зоны нагрева на периферию плазмы — так называемый эффект «density pump-out». При этом в течение первых 10—20 мс после включения центрального ЭЦР-нагрева вынос частиц из центра плазмы осуществляется, в основном, за счёт дополнительного диффузионного потока частиц, а в дальнейшем заметную роль начинает играть дополнительный конвективный поток частиц. В работе анализируются эксперименты по исследованию эффекта «density pump-out» на токамаке Т-10. Из решения обратных задач находятся коэффициент диффузии и скорость пинчевания частиц (потоки частиц) и определяется вынос частиц из центральной области плазмы в зависимости от мощности ЭЦР-нагрева и средней плотности плазмы.

Ключевые слова: токамак Т-10, эффект «density pump-out», электронно-циклотронный нагрев плазмы, коэффициент диффузии, скорость пинчевания частиц, обратная коэффициентная задача.

STUDY OF PARTICLES CARRY-OVER FROM THE PLASMA CENTRE AFTER ON-AXIS ELECTRON CYCLOTRON RESONANCE HEATING SWITCHING IN THE T-10 TOKAMAK

N.V. Kas'yanova, V.F. Andreev

Tokamak Physics Institute, Kurchatov Centre of Nuclear Technologies, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The study of the particle transport at on-axis electron cyclotron resonance heating (ECRH) is of importance for the future tokamak-reactor ITER, since α -particles will produce the key contribution into plasma heating in the reactor, the heat being generated in the plasma center. The experiments at tokamaks and stellarators have shown that after on-axis ECRH switching on the additional (both diffusion and convective) carry-over of particles from the heating zone to the plasma periphery appears. It is so the so-called «density pump out» effect. The additional diffusion flux plays the main role in the «density pump out» effect during the first 10—20 ms after the on-axis ECRH switching on, but after this time the convective particle flux becomes dominant. In the paper the experiments exploring the «density pump out» effect in the T-10 tokamak are analyzed. The inverse problem solving was used for reconstruction of the diffusion coefficient and the particle pinching rate (particle flux) as well as for the determination of the particles carry-over from the plasma central area as the function of the ECRH power and the average plasma density.

Key words: T-10 tokamak, «density pump-out» effect, ECR heating, diffusivity coefficient, particle pinch rate, inverse problem.

ВВЕДЕНИЕ

Данная статья является продолжением работы [1], в которой исследовался скачок коэффициента диффузии и скорости пинчевания частиц после включения центрального ЭЦР-нагрева на токамаке Т-10. Обзор литературы по изучению эффекта «density pump-out» на других установках, т.е. по выносу частиц из зоны нагрева, можно найти во введении к работе [1], поэтому он здесь не даётся.

Отметим, что анализируемые в работе [1] эксперименты были проведены в разные экспериментальные кампании и дни и по разным экспериментальным программам, в которых изменялись сразу несколько параметров плазмы. Данное обстоятельство создавало большие трудности для нахождения зависимости коэффициентов переноса от изменения одного параметра плазмы.

Поэтому за прошедшее время на токамаке Т-10 были проведены новые эксперименты по исследованию эффекта «density pump-out». Основная цель этих экспериментов состояла в том, чтобы в серии последовательных импульсов изменялся только один параметр плазмы — средняя плотность, а саму серию проводить в один экспериментальный день, чтобы состояние установки (камеры) было одинаковым для всех импульсов. Такая постановка экспериментов позволяет делать выводы о зависимости эффекта «density pump-out» от параметров плазмы с достаточно высокой степенью обоснованности.

В результате были получены серии импульсов при двух мощностях центрального ЭЦР-нагрева, в которых средняя плотность плазмы изменялась в максимально возможном диапазоне при данных параметрах плазмы.

Целью данной работы является анализ экспериментов по исследованию эффекта «density pump-out» при разной мощности центрального ЭЦР-нагрева и разной плотности плазмы. Для этого в работе находятся коэффициент диффузии и скорость пинчевания частиц (поток частиц) из анализа переходного процесса после включения нагрева и определяется вынос частиц из центральной области плазмы в зависимости от мощности ЭЦР-нагрева и средней плотности плазмы. Для анализа экспериментальных данных использовался метод, основанный на восстановлении коэффициентов переноса и источников из решения обратных задач для уравнений транспортной модели [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты по изучению выноса частиц из зоны центрального ЭЦР-нагрева проводились на установке Т-10 (малый радиус $a = 0,3$ м, большой радиус $R_0 = 1,5$ м) при двух значениях мощности нагрева P_{EC} и фиксированном полном токе плазмы I_p . Первая серия экспериментов проводилась при мощности $P_{\text{EC}} \sim 0,55$ МВт, токе плазмы $I_p = 180$ кА, средняя плотность плазмы перед включением нагрева изменялась от $\langle n_e \rangle = 1,4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ до $\langle n_e \rangle = 3,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, вторая серия экспериментов — при мощности $P_{\text{EC}} \sim 1,1$ МВт, токе плазмы $I_p = 180$ кА, средняя плотность плазмы перед включением нагрева изменялась в диапазоне $\langle n_e \rangle = (1,4—3,3)10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Плотность плазмы измерялась с помощью микроволнового интерферометра (5 каналов) и лазерного интерферометра (7 каналов). Для восстановления локальных значений плотности по результатам хордовых измерений решалась задача абелизации.

Отметим, что в работе рассматриваются и анализируются эксперименты только с центральным ЭЦР-нагревом (2 гиротрона 130 ГГц, мощность $P_{\text{EC}} \sim 1,1$ МВт или $P_{\text{EC}} \sim 0,55$ МВт, тороидальное магнитное поле $B_T = 2,33$ Тл), поэтому в дальнейшем в статье при упоминании ЭЦР-нагрева будем иметь в виду именно центральный нагрев.

Временная эволюция средней плотности плазмы $\langle n_e \rangle$ для первой серии экспериментов с мощностью $P_{\text{EC}} \sim 0,55$ МВт показана на рис. 1, а, для второй серии экспериментов с мощностью $P_{\text{EC}} \sim 1,1$ МВт — на рис. 1, б. Хорошо видно, что сразу после включения нагрева средняя плотность плазмы $\langle n_e \rangle$ начинает падать, причём амплитуда её изменения $\Delta \langle n_e \rangle$ зависит от средней плотности.

Рис. 1. Временная эволюция средней плотности плазмы $\langle n_e \rangle$ при разной средней плотности перед включением ЭЦР-нагрева для тока плазмы $I_p = 180$ кА, мощность $P_{\text{EC}} \sim 0,55$ (а), $\sim 1,1$ МВт (б)

На рис. 2 показана зависимость максимального изменения средней плотности плазмы $\Delta\langle n_e \rangle$ от средней плотности для мощности ЭЦР-нагрева $P_{\text{EC}} \sim 0,55, \sim 1,1$ МВт. Максимальное изменение плотности $\Delta\langle n_e \rangle$ определялось как разность значений средней плотности $\langle n_e \rangle$ на стационарной омической стадии перед включением нагрева и примерно через $\Delta t \sim 100$ мс после включения ЭЦР-нагрева, когда средняя плотность плазмы достигала своего наименьшего значения.

Из приведённых результатов видно, что изменение средней плотности плазмы $\langle n_e \rangle$ после включения ЭЦР-нагрева в обеих сериях экспериментов имеет одинаковую функциональную зависимость: сначала вынос частиц из зоны центрального нагрева увеличивается с ростом средней плотности до некоторого критического значения $\langle n_e^{\text{cr}} \rangle$, затем начинает уменьшаться. При этом величина $\langle n_e^{\text{cr}} \rangle$ зависит от мощности ЭЦР-нагрева. При мощности $P_{\text{EC}} \sim 0,55$ МВт критическая плотность составляет $\langle n_e^{\text{cr}} \rangle \sim 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, при мощности $P_{\text{EC}} \sim 1,1$ МВт — $\langle n_e^{\text{cr}} \rangle \sim 2,6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Рис. 2. Максимальное изменение средней плотности плазмы $\Delta\langle n_e \rangle$ в зависимости от средней плотности для тока $I_p = 180$ кА, мощность $P_{\text{EC}} \sim 0,55$ (●, ●, ●, ●), $\sim 1,1$ МВт (■, ■, ■, ■)

Отметим, что полученные экспериментальные результаты на токамаке T-10 (см. рис. 1, 2) отличаются от результатов, которые были приведены для токамака ASDEX Upgrade в работе [2]. При этом основное отличие состоит именно в выводе, что с ростом плотности плазмы эффект «density pump-out» уменьшается.

В этой связи можно сделать следующее замечание. Введём параметр $P_{\text{EC}}/(\langle n \rangle V)$ — удельная мощность, приходящая на частицу, и вычислим его для разных установок. Далее, для простоты, в статье будем сравнивать импульсы с одинаковой средней плотностью плазмы $\langle n \rangle$.

В экспериментах на ASDEX Upgrade максимальная мощность центрального ЭЦР-нагрева составляла $\sim 1,6$ МВт. Однако если учесть соотношение объёмов плазмы установки T-10 ($V \sim 2,66 \text{ м}^3$) и установки ASDEX Upgrade ($V \sim 13,2 \text{ м}^3$), которое составляет ~ 4 — 5 раз, то удельная мощность на частицу в ASDEX Upgrade будет примерно соответствовать экспериментам на T-10 с мощностью ЭЦР-нагрева 0,55 МВт при одинаковой средней плотности. При равной удельной мощности нагрева результаты на этих установках не противоречат друг другу.

В экспериментах на установке FTU ($V \sim 1,66 \text{ м}^3$, $P_{\text{EC}} \sim 0,7$ МВт) уменьшение эффекта «density pump-out» наблюдалось при большей плотности плазмы, чем на установке ASDEX Upgrade, что также можно объяснить гораздо большей удельной мощностью нагрева на частицу [3].

Эксперименты на токамаке TCV ($V \sim 1,77 \text{ м}^3$, $P_{\text{EC}} \sim 0,5$ — $2,0$ МВт) также не противоречат результатам — с ростом мощности ЭЦР-нагрева эффект «density pump-out» возрастал [4, 5].

Это означает, что сравнивать эксперименты с центральным ЭЦР-нагревом на разных установках необходимо при одинаковых условиях, в том числе и по удельной мощности нагрева, приходящейся на частицу.

Целью дальнейшего анализа экспериментов, проведённых на токамаке T-10, является нахождение выноса частиц из центральной области плазмы на периферию, возникающего после включения ЭЦР-нагрева. Рассматривается переходный процесс после включения нагрева, для которого из решения обратной задачи восстанавливаются коэффициент диффузии, скорость пинчевания частиц и, соответственно, поток частиц. Сравнение потоков частиц на стационарной омической стадии разряда перед включением ЭЦР-нагрева и после позволяет найти дополнительный вынос частиц из центральной области плазмы.

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА

Уравнение, описывающее баланс частиц для переходного процесса после включения ЭЦР-нагрева в момент времени $t = t_{\text{EC}}$, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_n \frac{\partial n}{\partial r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r n v_p) + S \quad (1)$$

с соответствующими начальными и граничными условиями

$$\frac{\partial n}{\partial r} (r = 0, t) = 0; n(r = a, t) = n_0; n(r, t = t_{\text{EC}}) = n^{\text{OH}}(r); 0 < r < a; 0 < t < t_{\text{EC}}. \quad (2)$$

Здесь $n(r, t)$ — электронная плотность; n_0 — граничная плотность плазмы; $n^{\text{OH}}(r)$ — стационарный омический профиль плотности перед включением нагрева; a — малый радиус; r — текущий радиус. Коэффициент диффузии D_n , скорость пинчевания частиц v_p и источник частиц S являются неизвестными функциями в уравнении (1), которые необходимо восстановить из решения обратной задачи.

Отметим, что в уравнении (1) полный поток частиц W содержит как диффузионную, так и конвективную часть, т.е.

$$W = -D_n \frac{\partial n}{\partial r} + v_p n. \quad (3)$$

Отрицательная скорость пинчевания частиц v_p означает, что конвективный поток $\Gamma_v = v_p n$ направлен от периферии к центру плазменного шнура, положительная скорость v_p означает, что конвективный поток Γ_v направлен из центра к границе плазмы.

Формулировка обратной задачи и численный алгоритм её решения описаны в работе [1]. Здесь приведём только некоторые основные моменты.

Численный алгоритм решения обратной задачи заключается в параметрическом представлении неизвестных искомым функций D_n , v_p и S по заданному полиномиальному базису. Таким образом, из решения обратной задачи восстанавливались коэффициент диффузии D_n , скорость пинчевания частиц v_p и источник частиц S .

В качестве экспериментальных данных $n^{\text{exp}}(r, t)$ для обратной задачи использовались локальные значения плотности, которые были получены по результатам хордовых измерений плотности плазмы из решения задачи абелизации. Подробно алгоритм абелизации, который используется в статье для получения локальных значений плотности, приведён в работе [6]. Здесь отметим только особенности применения в данном конкретном случае.

При численном решении задачи абелизации в качестве базиса выбирались следующие функции:

$$f(\rho) = \{(1 - \rho^2), (1 - \rho^2)^2, (1 - \rho^2)^3, (1 - \rho^2)^4, (1 - \rho^2)^5\}. \quad (4)$$

Выбор функций определялся из следующих соображений: в центре плазмы ($\rho = 0$) производная от плотности обращается в нуль, на границе плазмы ($\rho = 1$) плотность обращается в нуль. В случае токамака Т-10 граница плазмы ($\rho = 1$), на которой плотность обращается в нуль, выбирается на радиусе 35 см (малый радиус токамака Т-10 $a = 30$ см).

Отметим, что количество базисных функций определяется числом каналов измерения. В приведённых экспериментах было 11 каналов хордовых измерений плотности. Однако необходимо учесть, что каналы измерения плотности в Т-10 расположены почти симметрично, поэтому число базисных функций ограничивалось величиной 4—5.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Целью данного раздела является нахождение дополнительного выноса частиц из зоны центрального нагрева, возникающего после включения ЭЦР-нагрева. Для этого сначала находится поток частиц на стационарной омической стадии разряда, затем поток частиц в переходном процессе после включения нагрева. Для вычисления потока частиц восстанавливаются коэффициент диффузии и скорость пинчевания частиц на стационарной стадии перед включением центрального ЭЦР-нагрева и после, что позволяет найти соответствующие потоки частиц.

Сначала будем анализировать стационарную омическую стадию разряда перед включением ЭЦР-нагрева, т.е. найдём коэффициент диффузии D_n^{OH} , скорость пинчевания частиц v_p^{OH} и источник

частиц c_s^{OH} из решения обратной коэффициентной задачи. В этом случае входными экспериментальными значениями $n^{\text{exp}}(r, t)$ будут стационарные значения плотности $n^{\text{OH}}(r)$ перед включением ЭЦР-нагрева.

Так как на стационаре невозможно однозначно восстановить коэффициент диффузии и скорость пинчевания частиц, то при решении обратной задачи коэффициент диффузии задавался в следующем виде: $D_n^{\text{OH}}(r) = D_0 + D_1 r^4$. Величина коэффициента диффузии D_0 в центре плазмы для импульсов с разной плотностью выбиралась обратно пропорционально локальному значению центральной плотности $D_0 \sim 1/n(0)$.

Источник частиц задавался в виде полинома девятой степени вида [7]

$$S(r) = c_s \left[\sum_{j=0}^9 S_j r^j \right], \quad (5)$$

где S_j — коэффициенты полиномиального разложения. Из решения обратной задачи восстанавливались скорость пинчевания частиц v_p^{OH} и амплитуда источника частиц c_s^{OH} для омической стадии разряда и, соответственно, по формуле (3) вычислялся поток частиц W^{OH} на омической стационарной стадии разряда.

Далее анализировался переходный процесс после включения ЭЦР-нагрева. При решении обратной задачи фиксировался источник частиц S^{OH} , найденный для омической стадии разряда, восстанавливались коэффициент диффузии D_n и скорость пинчевания частиц v_p для переходного процесса.

Таким образом, для каждого импульса находились поток частиц на омической стадии разряда W^{OH} и поток частиц W в переходном процессе после включения нагрева. Используя полученные данные, вычислялся дополнительный вынос частиц из центральной области плазмы (разность потоков W^{OH} и W), который возникает после включения ЭЦР-нагрева.

На рис. 3 показана временная эволюция хордовых сигналов плотности для нескольких каналов измерения (импульс № 62 416, ток $I_p = 180$ кА, мощность $P_{\text{EC}} \sim 1,1$ МВт, $t_{\text{EC}} = 710$ мс — момент включения гиротронов). На рис. 4 даны профили хордовых сигналов плотности для этого же импульса на омической стадии разряда перед включением ЭЦР-нагрева и через $\Delta t \sim 100$ мс после включения ЭЦР-нагрева (R — большой радиус токамака, R_0 — центр камеры).

Рис. 3. Временная эволюция хордовых сигналов плотности для нескольких каналов измерения: - - - момент включения нагрева $t_{\text{EC}} = 710$ мс (импульс № 62 416, ток $I_p = 180$ кА, мощность $P_{\text{EC}} \sim 1,1$ МВт)

Рис. 4. Профиль хордовых сигналов плотности для двух моментов времени: □ — омический режим $t = 700$ мс (ОН); ○ — после включения ЭЦР-нагрева $t = 800$ мс (EC); R — большой радиус токамака; R_0 — центр камеры (№ 62 416, $I_p = 180$ кА, $P_{\text{EC}} \sim 1,1$ МВт)

Хорошо видно, что сразу после включения нагрева центральные хордовые каналы падают, а периферийные хордовые каналы растут. Такая эволюция плотности означает, что возникает дополнительный вынос частиц из центральной области на периферию плазмы.

На рис. 5 и 6 показано сравнение экспериментальных и расчётных значений локальной плотности n_e , полученных при решении обратной задачи для импульса № 62 416. Символы соответствуют экспериментальным величинам, сплошные кривые — результатам решения обратной задачи. Хорошее совпадение расчётных и экспериментальных значений плотности n_e указывает на высокую точность решения обратной задачи.

Рис. 5. Профиль плотности для нескольких моментов времени после включения ЭЦР-нагрева в момент времени $t_{EC} = 710$ (■), 715 (●), 720 (▲), 730 (▼), 755 мс (◆) (эксперимент); — — расчёт

Рис. 6. Временная эволюция плотности для нескольких радиусов после включения ЭЦР-нагрева в момент времени $t_{EC} = 710$ мс, $r = 0,2$ (■), $0,4$ (●), $0,6$ (▲), $0,7$ (▼), $0,8$ (◆) (эксперимент); — — расчёт

На рис. 7 представлен коэффициент диффузии D_n , на рис. 8 — скорость пинчевания частиц v_p для импульса № 62 416, найденные из решения обратной задачи на стационарной омической стадии разряда и после включения ЭЦР-нагрева. Результаты численных расчётов показывают, что после включения нагрева коэффициент диффузии D_n в центральной области плазмы ($r < 0,5a$) возрастает в ~ 5 — 7 раз, скорость пинчевания частиц v_p уменьшается по абсолютной величине, причём наиболее сильно на периферии плазмы ($r > 0,5a$).

Рис. 7. Профиль коэффициента диффузии D_n на омической стационарной стадии разряда (—) и после включения ЭЦР-нагрева (—)

Рис. 8. Профиль скорости пинчевания частиц v_p на омической стационарной стадии разряда (—) и после включения ЭЦР-нагрева (—)

Эволюция диффузионного потока частиц $\Gamma_D = -D_n \partial n / \partial r$ показана на рис. 9, а, конвективного потока частиц $\Gamma_V = v_p n$ — на рис. 9, б и полного потока частиц $W = \Gamma_D + \Gamma_V$ — на рис. 9, в на стационарной омической стадии разряда ($\Delta t < 0$) и после включения ЭЦР-нагрева ($\Delta t > 0$).

Численные результаты показывают, что после включения ЭЦР-нагрева возникает дополнительный как диффузионный, так и конвективный поток частиц, направленный из центральной области плазмы на периферию плазменного шнура. В последнем случае это выражается в уменьшении скорости пинчевания частиц v_p .

Рис. 9. Временная эволюция диффузионного потока частиц (а), конвективного потока частиц (б), полного потока частиц (в) для нескольких радиусов: $r = 0,1$ (—), $0,3$ (—), $0,5$ (—) (импульс № 62 416, $I_p = 180$ кА, $P_{EC} \sim 1,1$ МВт, $\langle n_e \rangle = 2,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$); $r = 0,1$ (---), $0,3$ (---), $0,5$ (---) (импульс № 62 422, $I_p = 180$ кА, $P_{EC} \sim 0,55$ МВт, $\langle n_e \rangle = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$); $\Delta t = 0$ — момент включения ЭЦР-нагрева

Отметим, что импульсы различаются между собой только мощностью ЭЦР-нагрева ($P_{EC} \sim 1,1$ МВт для № 62 416 и $P_{EC} \sim 0,55$ МВт для № 62 422), при этом средняя плотность плазмы $\langle n_e \rangle$ в обоих импульсах примерно одинаковая.

Из приведённых результатов видно, что диффузионный поток частиц в центральной области плазмы возрастает с увеличением мощности ЭЦР-нагрева (см. рис. 9, а), а конвективный поток частиц слабо зависит от мощности нагрева (см. рис. 9, б). При этом изменение полного потока частиц после включения ЭЦР-нагрева также существенным образом зависит от мощности дополнительного нагрева (см. рис. 9, в).

Приведём результаты численных расчётов выноса частиц из зоны центрального ЭЦР-нагрева для импульсов с более высокой средней плотностью плазмы.

Эволюция диффузионного потока частиц $\Gamma_D = -D_n \partial n / \partial r$ показана на рис. 10, а, конвективного потока частиц $\Gamma_V = v_p n$ — на рис. 10, б и полного потока частиц $W = \Gamma_D + \Gamma_V$ — на рис. 10, в на стационарной омической стадии разряда ($\Delta t < 0$) и после включения ЭЦР-нагрева ($\Delta t > 0$).

Рис. 10. Временная эволюция диффузионного потока частиц (а), конвективного потока частиц (б), полного потока частиц (в) для нескольких радиусов: $r = 0,1$ (—), $0,3$ (—), $0,5$ (—) (импульс № 62 418, $I_p = 180$ кА, $P_{EC} \sim 1,1$ МВт, $\langle n_e \rangle = 3,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$); $r = 0,1$ (---), $0,3$ (---), $0,5$ (---) (импульс № 62 424, $I_p = 180$ кА, $P_{EC} \sim 0,55$ МВт, $\langle n_e \rangle = 3,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$); $\Delta t = 0$ — момент включения ЭЦР-нагрева

Приведённые импульсы различаются между собой только мощностью ЭЦР-нагрева ($P_{EC} \sim 1,1$ МВт для № 62 418 и $P_{EC} \sim 0,55$ МВт для № 62 424), средняя плотность плазмы в обоих импульсах примерно одинаковая. Из численных результатов видно, что дополнительный диффузионный поток частиц в центральной области плазмы возрастает с увеличением мощности ЭЦР-нагрева (см. рис. 10, а). При этом дополнительный конвективный поток частиц слабо зависит от мощности нагрева (см. рис. 10, б).

Следует отметить, что по сравнению с импульсами с меньшей плотностью (№ 62 416 и № 62 422) дополнительный диффузионный вынос частиц из центральной области плазмы также растёт (см. рис. 9, а и 10, а).

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИСТОЧНИКА ЧАСТИЦ

Одна из сложностей при решении обратной задачи связана с восстановлением источника частиц из экспериментальных данных. Это объясняется большой неопределённостью потоков частиц, которые формируют источник частиц в плазме токамака. Во-первых, это поток нейтральных частиц, который определяется состоянием стенок камеры и диафрагмы (установка Т-10 — это лимитерный токамак). В каждом конкретном импульсе состояние стенок камеры и диафрагмы может отличаться от других импульсов. Во-вторых, это поток частиц из клапана газонапуска, который служит для поддержания заданной программы по плотности на всей стадии разряда. Этот поток частиц зависит как от мощности ЭЦР-нагрева, так и от состояния стенок камеры. Поэтому для исследования чувствительности восстановления коэффициента диффузии и скорости пинчевания частиц, а значит и потоков частиц, в зависимости от неопределённости в задании источника частиц были проведены дополнительные численные расчёты.

Профиль источника частиц можно найти, если решить задачу проникновения нейтралов, например, как это реализовано в коде ASTRA [8]. В работе [7] было показано, что решение задачи проникновения нейтралов в плазму, т.е. профиль источника частиц можно аппроксимировать приближено формулой (5) со следующими коэффициентами:

$$S(r) = c_s \left[\sum_{j=0}^9 S_j r^j \right]:$$

$$S_0 = 8,45 \cdot 10^0, S_1 = 4,14 \cdot 10^2, S_2 = 1,02 \cdot 10^4, S_3 = 1,08 \cdot 10^5, S_4 = 5,97 \cdot 10^5, \\ S_5 = 1,90 \cdot 10^6, S_6 = 3,59 \cdot 10^6, S_7 = 3,98 \cdot 10^6, S_8 = 2,38 \cdot 10^6, S_9 = 5,97 \cdot 10^5.$$

Поэтому при решении обратной задачи профиль источника частиц S задавался в виде спадающей функции от периферии к центру плазмы, амплитуда источника частиц c_s находилась из решения обратной задачи. Численные исследования проводились по следующему алгоритму.

Сначала для каждого анализируемого импульса восстанавливались коэффициент диффузии D_n^{OH} , скорость пинчевания частиц v_p^{OH} и амплитуда источника частиц S^{OH} на стационарной омической стадии разряда, как это было описано в предыдущем разделе. Далее восстанавливались коэффициент диффузии D_n и скорость пинчевания частиц v_p в переходном процессе после включения ЭЦР-нагрева

Рис. 11. Профиль источника частиц после включения ЭЦР-нагрева с различной амплитудой источника: $S^{\text{EC}} = S^{\text{OH}}$ (—); $1,25S^{\text{OH}}$ (—); $1,5S^{\text{OH}}$ (—); $1,75S^{\text{OH}}$ (—); $2S^{\text{OH}}$ (—) (импульс № 62 416, $I_p = 180$ кА, $P_{\text{EC}} \sim 1,1$ МВт, $\langle n_e \rangle = 2,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$)

при различных значениях амплитуды источника частиц S^{EC} на границе плазмы. Серия численных расчётов повторялась для амплитуды источника частиц, которая изменялась в диапазоне от $S^{\text{EC}} = S^{\text{OH}}$ до $S^{\text{EC}} = 2,0 \cdot S^{\text{OH}}$.

На рис. 11 показан профиль источника частиц после включения ЭЦР-нагрева при разной амплитуде источника частиц S^{EC} на границе плазмы (импульс № 62 416, ток $I_p = 180$ кА, мощность $P_{\text{EC}} \sim 1,1$ МВт). На рис. 12 показано изменение полного потока частиц $\Delta \Gamma = \Gamma^{\text{EC}} - \Gamma^{\text{OH}}$ после включения нагрева по сравнению с омическим режимом, на рис. 13 — изменение потока частиц $\Delta \Gamma^{\text{EC}} = \Gamma^{\text{EC}} - \Gamma^{\text{EC}}(S^{\text{OH}})$ после включения ЭЦР-нагрева при разных значениях амплитуды источника S^{EC} , где поток $\Gamma^{\text{EC}}(S^{\text{OH}})$ получен при амплитуде источника S^{EC} после включения ЭЦР-нагрева $S^{\text{EC}} = S^{\text{OH}}$.

Хорошо видно, что при увеличении амплитуды источника частиц S^{EC} на границе плазмы в 2 раза полный поток частиц в центральной области плазмы $r < 0,5$ растёт менее чем на 10%. Аналогичные результаты получены и для других импульсов.

Рис. 12. Изменение полного потока частиц после включения ЭЦР-нагрева в зависимости от амплитуды источника: $S^{\text{EC}} = S^{\text{OH}}$ (—); $1,25S^{\text{OH}}$ (—); $1,5S^{\text{OH}}$ (—); $1,75S^{\text{OH}}$ (—); $2S^{\text{OH}}$ (—) (импульс № 62 416, $I_p = 180$ кА, $P_{\text{EC}} \sim 1,1$ МВт, $\langle n_e \rangle = 2,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$)

Рис. 13. Изменение потока частиц после включения ЭЦР-нагрева в зависимости от амплитуды источника: $S^{\text{EC}} = 1,25S^{\text{OH}}$ (—); $1,5S^{\text{OH}}$ (—); $1,75S^{\text{OH}}$ (—); $2S^{\text{OH}}$ (—) (импульс № 62 416, $I_p = 180$ кА, $P_{\text{EC}} \sim 1,1$ МВт, $\langle n_e \rangle = 2,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$)

Таким образом, результаты проведённых численных исследований показали, что при мощности ЭЦР-нагрева в диапазоне $P_{\text{EC}} \sim 0,55\text{—}1,1$ МВт увеличение амплитуды источника частиц S^{EC} на границе плазмы в 2 раза незначительно влияет на изменение полного потока частиц в центральной области плазмы ($r < 0,5$). Это позволяет утверждать, что неопределённость в восстановлении источника частиц является малозначимым параметром и поэтому слабо влияет на полученные результаты и сделанные выводы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённые эксперименты по исследованию выноса частиц из зоны ЭЦР-нагрева показали следующее.

После включения нагрева изменение средней плотности плазмы $\Delta\langle n_e \rangle$ и $\Delta\langle n_e \rangle / \langle n_e \rangle$ имеет одинаковую функциональную зависимость от средней плотности $\langle n_e \rangle$ при фиксированном полном токе плазмы и разной мощности нагрева, а именно с ростом средней плотности плазмы происходит увеличение выноса частиц из зоны нагрева на периферию до некоторого критического значения плотности $\langle n_e^{\text{cr}} \rangle$, начиная с которого вынос частиц из зоны ЭЦР-нагрева уменьшается. При этом критическое значение плотности $\langle n_e^{\text{cr}} \rangle$ зависит от мощности нагрева.

Проведённые численные расчёты показали, что с увеличением мощности нагрева значительно возрастает полный поток частиц из центральной области плазмы (см. рис. 9, в и 10, в). Это означает, что одним из главных параметров, определяющим дополнительный вынос частиц из зоны ЭЦР-нагрева (эффект «density rump-out»), является именно мощность нагрева. Данный вывод подтверждает результаты, которые были получены при анализе экспериментов с разной мощностью ЭЦР-нагрева в работе [1].

На основе проведённых экспериментов и их анализа можно утверждать, что дополнительный диффузионный вынос частиц из зоны нагрева, возникающий после включения ЭЦР-нагрева, зависит от его мощности. Восстановление коэффициента диффузии из решения обратных коэффициентных задач показывает, что с ростом мощности нагрева происходит рост коэффициента диффузии в центральной области плазмы и, соответственно, возрастает диффузионный вынос частиц из этой области (см. рис. 9, а и 10, а). В то же время дополнительный конвективный вынос частиц, который возникает после включения ЭЦР-нагрева, слабо зависит от изменения мощности нагрева (см. рис. 9, б и 10, б).

Хорошо видно, что максимальное изменение диффузионного потока частиц и, соответственно, полного потока частиц происходит в первые 10—20 мс после включения ЭЦР-нагрева. Это объясняет-

ся тем, что после включения нагрева коэффициент диффузии резко возрастает (см. рис. 7), а градиент плотности в центральной области плазмы ещё не успевает сильно измениться. Далее по мере уплотнения профиля плотности в центральной области плазмы происходит уменьшение диффузионного потока (см. рис. 9, *а* и 10, *а*). В то же время конвективный поток частиц практически постоянен во времени (см. рис. 9, *б* и 10, *б*).

На рис. 14, *а* показаны профили плотности для нескольких моментов времени после включения ЭЦР-нагрева (импульс № 62 416, ток $I_p = 180$ кА, мощность $P_{EC} \sim 1,1$ МВт, средняя плотность плазмы $\langle n_e \rangle \sim 2,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$). Хорошо видно, что происходит сильное уплотнение профиля плотности в центральной области плазмы, что приводит к уменьшению диффузионного потока частиц из центра.

На рис. 14, *б* показаны профили плотности для нескольких моментов времени после включения нагрева для импульса с меньшей мощностью (импульс № 62 422, ток $I_p = 180$ кА, мощность $P_{EC} \sim 0,55$ МВт, средняя плотность плазмы $\langle n_e \rangle \sim 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$). В этом случае профиль плотности изменяется слабо, однако и диффузионный поток частиц значительно меньше, чем в предыдущем случае, за

Рис. 14. Эволюция профиля плотности после включения центрального ЭЦР-нагрева: $t = 710$ (—), 712 (—), 720 (—), 730 (—), 740 (—), 750 (—), 760 (—), 770 (—), 780 (—), 790 мс (—) (импульс № 62 416, $I_p = 180$ кА, $P_{EC} \sim 1,1$ МВт, $\langle n_e \rangle = 2,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$) (*а*); $t = 712$ (—), 714 (—), 722 (—), 732 (—), 742 (—), 752 (—), 762 (—), 772 (—), 782 (—), 792 мс (—) (№ 62 422, $I_p = 180$ кА, $P_{EC} \sim 0,55$ МВт, $\langle n_e \rangle = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$) (*б*)

счёт слабого изменения коэффициента диффузии. Это подтверждает тот факт, что на изменение диффузионного потока главным образом влияет именно мощность ЭЦР-нагрева.

На рис. 15, *а* показаны профили плотности для нескольких моментов времени после включения ЭЦР-нагрева (импульс № 62 418, ток $I_p = 180$ кА, мощность $P_{EC} \sim 1,1$ МВт, средняя плотность плазмы $\langle n_e \rangle \sim 3,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$). Видно, что при большой плотности не наблюдается сильного уплотнения профиля

Рис. 15. Эволюция профиля плотности плазмы после включения центрального ЭЦР-нагрева: $t = 710$ (—), 712 (—), 720 (—), 730 (—), 740 (—), 750 (—), 760 (—), 770 (—), 780 (—), 790 мс (—) (№ 62 418, $I_p = 180$ кА, $P_{EC} \sim 1,1$ МВт, $\langle n_e \rangle = 3,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$) (*а*); $t = 712$ (—), 714 (—), 722 (—), 732 (—), 742 (—), 752 (—), 762 (—), 772 (—), 782 (—), 792 мс (—) (№ 62 424, $I_p = 180$ кА, $P_{EC} \sim 0,55$ МВт, $\langle n_e \rangle = 3,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$) (*б*)

плотности в центральной области плазмы по сравнению с импульсом № 62 416, что и приводит к росту диффузионного потока частиц из центра.

На рис. 15, б показаны профили плотности для нескольких моментов времени после включения нагрева для импульса с меньшей мощностью (импульс № 62 424, ток $I_p = 180$ кА, мощность $P_{EC} \sim 0,55$ МВт, средняя плотность плазмы $\langle n_e \rangle \sim 3,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$). В этом случае профиль плотности также изменяется слабо, однако диффузионный поток значительно меньше, чем в предыдущем случае (импульс № 62 418). Это ещё раз доказывает тот факт, что на изменение диффузионного потока главным образом влияет мощность ЭЦР-нагрева.

Таким образом, в течение первых 10—20 мс после включения ЭЦР-нагрева дополнительный вынос частиц из центральной области плазмы осуществляется, в основном, за счёт изменения диффузионного потока частиц. В дальнейшем из-за уменьшения градиента плотности в центре и, соответственно, диффузионного потока частиц заметную роль начинает играть дополнительный конвективный поток частиц.

ВЫВОДЫ

Эксперименты, проведённые на токамаке Т-10 с разной мощностью центрального ЭЦР-нагрева, показали, что вынос частиц из зоны нагрева растёт с увеличением средней плотности плазмы до некоторого критического значения плотности $\langle n_e^{cr} \rangle$, затем начинает уменьшаться. При этом критическое значение плотности зависит от мощности ЭЦР-нагрева при фиксированном токе плазмы $I_p = 180$ кА: $\langle n_e^{cr} \rangle \sim 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ для $P_{EC} \sim 0,55$ МВт и $\langle n_e^{cr} \rangle \sim 2,6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ для $P_{EC} \sim 1,1$ МВт.

Из решения обратных задач найдено изменение потоков частиц (диффузионного, конвективного и полного) при разных значениях плотности плазмы и мощности центрального ЭЦР-нагрева.

Анализ экспериментальных данных показал, что после включения центрального ЭЦР-нагрева возникает дополнительный как диффузионный, так и конвективный поток частиц из центральной области на периферию плазмы.

Показано, что в течение первых 10—20 мс после включения центрального ЭЦР-нагрева вынос частиц из центральной области плазмы осуществляется, в основном, за счёт дополнительного диффузионного потока частиц, в дальнейшем заметную роль начинает играть дополнительный конвективный поток частиц.

Работа выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом» (ГК от 13.05.2013 г. № Н.4х.44.90.13.1101), Научной Школы (контракт № 4268.2014.2).

REFERENCES

1. Kas'yanova N.V., Andreev V.F. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2012, issue 4, pp. 71—79 (in Russian).
2. Angioni C. et al. — Nucl. Fusion, 2004, vol. 44, p. 827.
3. Tuccillo A.A. et al. — Nucl. Fusion, 2011, vol. 51, 094015 (11 p.).
4. Zabolotsky A., Weisen H., TCV Team. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2003, vol. 45, p. 735.
5. Zabolotsky A., Weisen H., TCV Team. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2006, vol. 48, p. 369.
6. Skovoroda A.A., Andreev V.F., Kas'yanova N.V., Spitsyn A.V. — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2013, vol. 39, № 7, pp. 647—654 (in Russian).
7. Andreev V.F., Dnestrovskiy Yu.N., Cherkasov S.V. — Fizika plazmy (Plasma Physics), 1998, vol. 24, № 8, pp. 690—696 (in Russian).
8. Pereverzev G.V., Yushmanov P.N. ASTRA: Automated System for Transport Analysis in a Tokamak. Report IPP 5/42 Max-Planck-Institute fur Plasmaphysik. Garching, 2002, p. 84.

AUTHORS

Kas'yanova N.V. Tokamak Physics Institute, Kurchatov Centre of Nuclear Technologies, NRC «Kurchatov Institute», pl. Kurchatova 1, 123182, Moscow, Russia; kasianova_n@mail.ru

Andreev V.F. Tokamak Physics Institute, Kurchatov Centre of Nuclear Technologies, NRC «Kurchatov Institute», pl. Kurchatova 1, 123182, Moscow, Russia; Andreev_VF@nrcki.ru

Received 11 March 2014

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2014, vol. 37, issue 2, pp. 73—83.