

УДК 533.9.082

## ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ CXRS В ТОКАМАКЕ T-10

Л.А. Ключников<sup>1</sup>, В.А. Крупин<sup>1</sup>, К.В. Коробов<sup>1</sup>, М.Р. Нургалиев<sup>1</sup>, А.Р. Немец<sup>1</sup>, А.Ю. Днестровский<sup>1</sup>,  
Н.Н. Науменко<sup>2</sup>, С.Н. Тугаринов<sup>3</sup>, С.В. Серов<sup>1</sup>, Д.С. Деньщиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Отделение токамаков, НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

В статье приведены результаты измерений профилей ионной температуры и концентрации ядер примесей, выполненных с помощью модернизированной активной спектроскопической диагностики (CXRS) токамака T-10. Показано совпадение радиальных профилей ионной температуры, измеренных по линиям различных примесей. Продемонстрировано заметное отличие температуры ядер примесей от температуры, определяемой из уширения линии атомов рабочего газа (дейтерия), что может быть связано с влиянием эффекта «гало». Проведены измерения профилей и абсолютных величин концентраций ядер одновременно двух основных примесей (углерод, кислород) плазмы T-10 в широком диапазоне параметров плазмы, в том числе при ЭЦР-нагреве. Приводятся результаты, демонстрирующие аккумуляцию ядер лёгких примесей у оси шнура в омических разрядах T-10 с высокой плотностью и низкими токами плазмы. В экспериментах с ЭЦР-нагревом наблюдается эффективное удаление примесей из центральной зоны. Демонстрируется пример одновременных измерений динамики ядер основных примесей плазмы при импульсной инжекции дополнительной примеси. Модернизированная CXRS-диагностика T-10 обеспечивает получение необходимых данных для изучения электрических полей, переноса тепла и частиц в плазме, а также исследования свойств геодезических акустических мод (ГАМ) плазменных колебаний на T-10.

**Ключевые слова:** токамак T-10, активная спектроскопия, ионная температура, концентрация ядер, CXRS, ГАМ.

## CAPABILITIES OF SPECTROSCOPIC DIAGNOSTICS CXRS IN T-10 TOKAMAK

L.A. Klyuchnikov<sup>1</sup>, V.A. Krupin<sup>1</sup>, K.V. Korobov<sup>1</sup>, M.R. Nurgaliev<sup>1</sup>, A.R. Nemets<sup>1</sup>, A.Yu. Dnestrovskij<sup>1</sup>,  
N.N. Naumenko<sup>2</sup>, S.N. Tugarinov<sup>3</sup>, S.V. Serov<sup>1</sup>, D.S. Denschikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Tokamaks, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Physics National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

<sup>3</sup>Institution «Project Center ITER», Moscow, Russia

The results of the ion temperature and impurities concentration profile measurements performed with the modernized active spectroscopic diagnostics CXRS (Charge eXchange Recombination Spectroscopy) of the T-10 tokamak are described. The agreement of ion temperature radial profiles measured using lines of different impurities is shown. Noticeable difference between measured impurity and deuterium temperature profiles is observed, that can be caused by influence of the «halo» effect. Profiles and absolute values of nuclear concentrations of two dominant impurities (carbon and oxygen) in T-10 plasma were measured simultaneously in a wide range of plasma parameters including ECR heating. Experimental results demonstrating accumulation of light impurity nuclei near plasma column in ohmic heating discharges with high plasma density and low currents are shown. Efficient removal of impurities from plasma center was observed in experiments with the ECR heating. An example of simultaneous measurements of dominant impurities nuclear dynamics in the plasma under pulsed injection of additional impurity is presented. Modernized T-10 CXRS diagnostics secures acquisition of necessary data for studies of electric fields, heat and particle transport and for investigation of geodesic acoustic modes (GAM) of plasma oscillations of T-10.

**Key words:** T-10 tokamak, active spectroscopy, ion temperature, ion concentration, CXRS, GAM.

## ВВЕДЕНИЕ

К числу наиболее важных параметров, требующих детального и надёжного измерения в условиях современных токамаков и будущего токамака-реактора, относятся такие параметры, как величина и профиль ионной температуры  $T_i(r)$ , скорости вращения шнура, а также концентрации ядер примесей  $n_Z(r)$  в плазме. Базовой диагностикой, позволяющей обеспечить локальные измерения этих параметров в условиях токамака, является CXRS-диагностика (Charge eXchange Recombination Spectroscopy), развитая на T-10 [1], а также на многих других плазменных установках [2—6].

Данная статья посвящена обзору результатов измерения параметров плазмы и исследования физических процессов, протекающих в токамаке, с помощью модернизированной схемы CXRS-измерений на T-10 [1]. Базовым элементом используемой CXRS-схемы является диагностический инжектор атомов водорода с энергией атомов 30 кэВ, позволяющий проводить измерения с временным разрешением 1 мс и периодом ~40 мс. Измерения параметров плазмы проводятся в девяти пространственных точках шнура, равномерно распределённых по вертикали вдоль оси пучка от -15 до 30 см при радиусе рельсового лимитера  $a_L = 30$  см. Основной особенностью модернизированной CXRS-диагностики, отличающей её от мно-

гих зарубежных аналогов, является использование в схеме измерений трёх светосильных спектрометров, что позволяет одновременно регистрировать CXRS-линии двух выбранных примесей и  $H_{\alpha}$ -линию пучка. С помощью данной схемы проведены измерения профилей концентраций ядер  $n_Z(r)$  собственных примесей плазмы Т-10: углерода и кислорода, а также инжектированных примесей: He, Li, N, Ne.

Несмотря на широкое использование данной диагностики на различных установках с магнитным удержанием, актуальной задачей остаётся доработка методических вопросов CXRS-измерений, связанных с верификацией величин используемых скоростных коэффициентов и учётом эффектов, искажающих измерения, подробно описанных в работе [6]. В частности, CXRS-диагностика Т-10 обеспечивает возможность сравнения ионной температуры, измеренной по линиям различных элементов, что необходимо для экспериментального исследования эффекта «гало», связанного с возникновением паразитного линейчатого излучения вне зоны локализации нейтрального пучка, что может вносить искажения в измеряемый профиль ионной температуры. Отработка методики измерения профилей ионной температуры особенно актуальна ввиду проводящегося на Т-10 исследования геодезических акустических мод (ГАМ) [7], которые могут в значительной степени определять характер транспортных процессов в плазме токамака. Поведение ГАМ во многом зависит от величины и профиля ионной температуры в зоне возбуждения колебаний на периферии шнура.

Основной целью создания и развития CXRS-диагностики наряду с обеспечением научных программ Т-10 данными о профилях  $T_i(r)$  и  $n_Z(r)$  является изучение процессов переноса тепла и частиц в плазме токамака. Данная задача предъявляет высокие требования к качеству CXRS-измерений и измерениям с помощью вспомогательных диагностик. При исследовании переноса ядер лёгких примесей в плазме Т-10 используются совместные данные CXRS-диагностики [1], комплекса, измеряющего эффективный заряд плазмы  $Z_{\text{эф}}(r)$  [8], а также данные об интенсивности линий водородоподобных ионов примесей. Такой набор диагностик даёт возможность осуществить надёжные измерения стационарных профилей концентрации ядер примесей вместе с их ионизационными источниками, что позволяет как минимум провести оценку интегрального времени удержания ядер  $\tau_Z^{\text{conf}}$ . Получаемые в эксперименте на Т-10 данные о динамике изменения профилей ядер и их источников (например, вследствие изменения параметров плазмы либо потоков примеси в разряд) позволяют дать оценку детальных параметров переноса: коэффициентов диффузии  $D_Z^{\text{An}}(r)$  и конвективных скоростей  $V_Z^{\text{An}}(r)$  ядер примесей. Пример измерений транспортных коэффициентов примесей на Т-10 приведён в работе [9]. Отметим, что выполненная модернизация CXRS-диагностики Т-10 даёт возможность детально исследовать зависимости переноса примесей С и О от параметров плазмы как в омических режимах, так и в режимах с ЭЦР-нагревом.

Экспериментальные результаты, приведённые в статье, в основном преследуют цель продемонстрировать возможности созданной диагностики и надёжность выполняемых измерений. В то же время представленные в качестве примера результаты содержат в методическом плане весь экспериментальный материал, необходимый для исследования физики транспортных процессов в плазме.

## ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

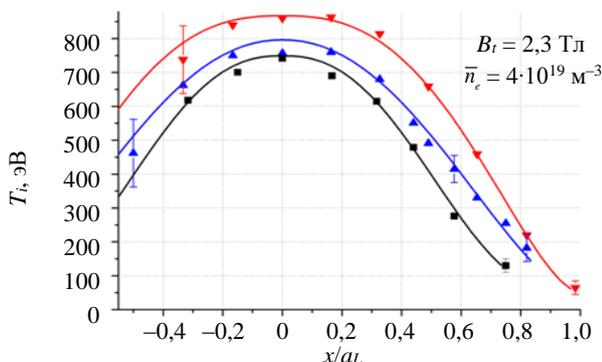


Рис. 1. Профили ионной температуры, измеренные с помощью CXRS-диагностики по линии углерода  $C^{5+}$  в омических разрядах с величиной средней электронной плотности  $\bar{n}_e = 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и различными величинами тока плазмы:  $I_p = 300$  кА ( $\blacktriangledown$ ), 220 кА ( $\blacktriangle$ ), 180 кА ( $\blacksquare$ )

Модернизация CXRS-диагностики позволила существенно уменьшить уровень ошибки при измерениях профилей ионной температуры в стационарной стадии разряда. На рис. 1 представлены профили ионной температуры, измеренные в омических разрядах с различной величиной тока при средней плотности  $\bar{n}_e = 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  (здесь и далее  $\bar{n}_e$  — средняя плотность, измеренная вдоль центральной хорды и рассчитанная на радиус лимитера  $a_L = 30$  см).

При вариации величины тока плазмы наблюдаются изменения формы профиля ионной температуры: при высоком токе (при низком значении фактора запаса устойчивости  $q(a_L)$ ) профиль  $T_i(r)$

становится существенно шире за счёт расширения профиля плотности тока и прогрева периферийных слоёв плазмы. Такое поведение характерно также для профилей электронной температуры [10].

Модернизированная схема диагностики обладает возможностью измерения профилей температуры одновременно по нескольким спектральным линиям. Это позволяет сравнить влияние эффекта «галло», описанного в [11], на результаты измерения ионной температуры по линиям примесей и рабочего газа. Также схема CXRS-измерений на базе составного спектрометра может использоваться для сравнения ионной температуры различных примесей в ОН и ЭЦРН-разрядах. Проведение такого сравнения актуально в условиях установки T-10 с невысокой ионной температурой ( $\leq 1$  кэВ), при которой эффект «галло» не способен исказить величины  $T_i$ , определяемые из уширения CXRS-линий примесей [12]. При этом следует ожидать, что профили температур различных сортов ионов окажутся одинаковыми вследствие малого времени выравнивания температуры между различными ионами плазмы T-10 ( $< 1$  мс). На рис. 2 представлено сравнение профилей температуры гелия и углерода в омическом разряде с малой добавкой гелия.

Несмотря на то, что CXRS-измерения профиля  $T_i$  по линии гелия имеют сравнительно высокую статистическую ошибку, наблюдается совпадение температуры ядер гелия и углерода в пределах ошибок измерений во всём сечении шнура, что подтверждает корректность выполнения измерений и используемой методики обработки результатов.

Качественно иная картина наблюдается при сравнении профилей ионной температуры, измеренных по линиям примесей и линии рабочего газа  $D_\alpha$ . На рис. 3 приведены профили ионной температуры в омических разрядах, измеренные с использованием CXRS-линий  $C^{5+}$  и  $D_\alpha$ . Значения, измеренные по уширению линии дейтерия, в центре плазмы лежат ниже, а на периферии — выше значений, измеренных по линии  $C^{5+}$ . Такое различие форм измеряемых на T-10 профилей  $T_i$  носит регулярный характер и связано с влиянием эффекта «галло» [13], ухудшающего пространственную локализацию измерений по линии  $D_\alpha$ . Для описания указанного эффекта была применена модель, разработанная в коде FIDA [14].

Вопрос о влиянии галло на CXRS-измерения ионной температуры является важным, в первую очередь, для установок с величиной температуры  $T_i > 2-3$  кэВ, в которых атомы дейтериевого галло способны индуцировать дополнительное свечение CXRS-линий примесей. В этом отношении параметры плазмы на T-10 выгодны для проведения исследования данного эффекта, поскольку по уширению CXRS-линий примесей измеряются неискажённые профили ионной температуры. Это условие необходимо для проверки достоверности описания в модели влияния эффекта «галло» на искажение профиля ионной температуры, измеренного по линии рабочего газа.

Смоделированный профиль  $T_i$ , учитывающий искажения, связанные с влиянием галло, показан на рис. 3. В модель в качестве исходных данных закладывается профиль ионной температуры, измеренный по линии  $C^{5+}$ , затем с учётом пространственного распределения атомов галло и геометрии наблюдения моделируются спектры излучения линии  $D_\alpha$ , из спектральной ширины которых определяется величина

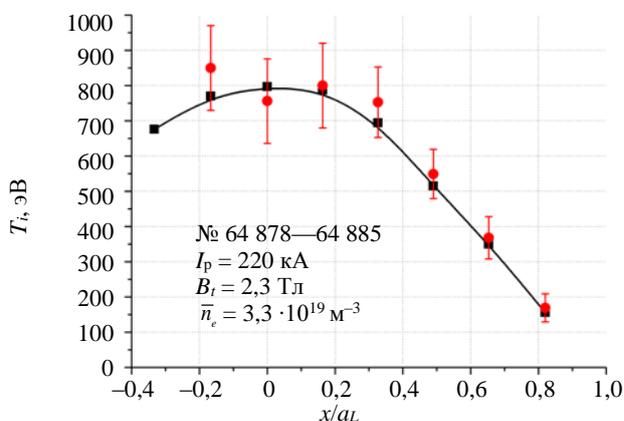


Рис. 2. Профили ионной температуры в омическом разряде с добавкой гелия, ток плазмы  $I_p = 220$  кА, средняя плотность  $\bar{n}_e = 3,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ : ■ — измерения по CXRS-линии углерода; ● — измерения по CXRS-линии гелия

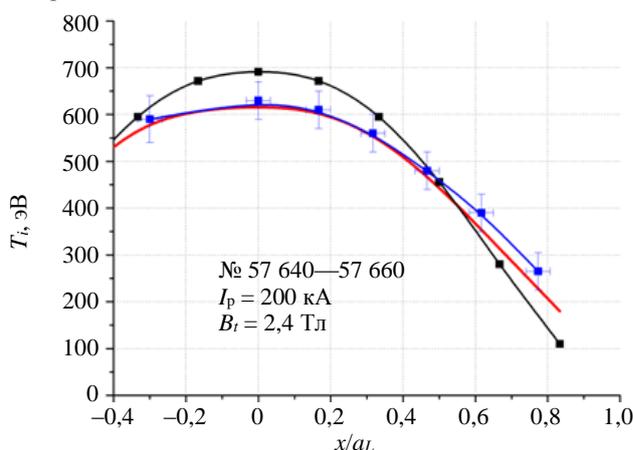


Рис. 3. Профили ионной температуры в омическом разряде с током плазмы  $I_p = 200$  кА и средней хордовой плотностью  $\bar{n}_e = 4,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ : ■ — измерения по линии углерода; ■ — измерения по линии дейтерия; — результат моделирования искажённого профиля в коде FIDA

температуры. Можно видеть качественное совпадение смоделированного профиля температуры и профиля, измеренного в эксперименте по CXRS-линии дейтерия.

Результаты измерений ионной температуры с использованием модернизированной схемы CXRS-измерений позволили провести анализ ГАМ [15, 16] и неклассическое моделирование профилей электрического поля на токамаке T-10 [17].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЯДЕР ПРИМЕСЕЙ

Интенсивность излучения CXRS-линии, индуцированной перезарядкой ядер примеси на атомах пучка, пропорциональна концентрации атомов пучка, концентрации ядер примеси и скоростному коэффициенту возбуждения соответствующей CXRS-линии:

$$I_{Z\_CXRS} = \sum_i n_{\text{Beam}_i} n_Z Q_{Z\_CXRS\_i}, \quad (1)$$

где  $n_{\text{Beam}_i}$  — концентрация атомов  $i$ -го энергетического компонента пучка;  $n_Z$  — концентрация ядер примеси;  $Q_{Z\_CXRS\_i}$  — скоростной коэффициент возбуждения CXRS-линии ядер примеси атомами  $i$ -го компонента пучка.

Для проверки корректности используемых моделей атомных процессов рассматриваются измерения в омических разрядах с высоким током плазмы, для которых характерен профиль  $Z_{\text{эф}}(r) = \text{const}$ , т.е.

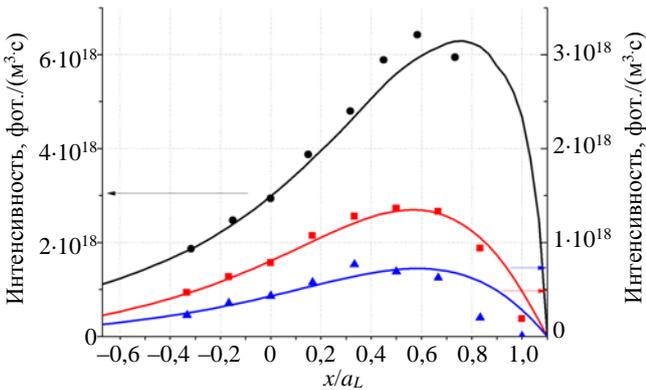


Рис. 4. Радиальное распределение интенсивностей свечения спектральных линий, индуцированных прохождением пучка через плазму: линия  $H_{\alpha}$  нейтрального пучка (●); CXRS-линия углерода  $C^{5+}$  (■); CXRS-линия кислорода  $O^{7+}$  (▲); результат расчёта с использованием атомных данных из базы ADAS — сплошные линии соответствующего цвета [18]

распределение концентраций примесей по радиусу в данном случае подобно профилю плотности электронов. Такое распределение примесей исключает возможность ошибки, связанной с неверной оценкой распределения примесей в плазме.

На рис. 4 показаны распределения интенсивностей линии  $H_{\alpha}$  основного компонента пучка и CXRS-линий углерода и кислорода в омическом разряде с током 300 кА и средней плотностью  $\bar{n}_e = 4,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

Полученные величины  $n_C/n_e = 3\%$  и  $n_O/n_e = 3\%$  соответствуют величине  $Z_{\text{эф}}(r) \approx 3,5$ , что по величине и профилю в пределах 15% согласуется с значениями  $Z_{\text{эф}}(r)$ , измеренными из профиля интенсивности тормозного континуума [8]. На периферии шнура ( $\rho > 0,8$ ) наблюдается спад измеренных интенсивностей CXRS-линий C и O, поскольку в этой области ядра примесей перезаряжаются на атомах дейтерия, переходя в более низкие зарядовые состояния.

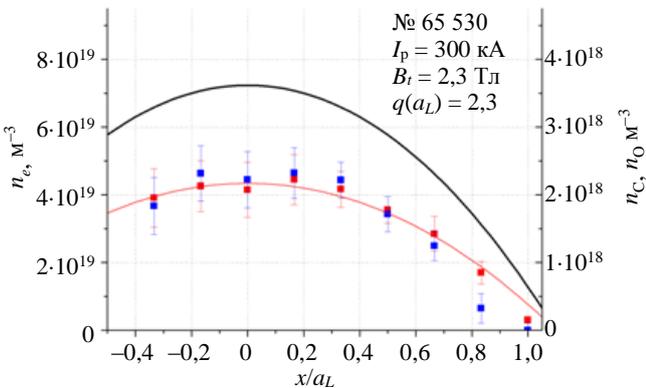


Рис. 5. Радиальное распределение измеренных концентраций ядер примесей в омическом разряде с током  $I_p = 300$  кА и величиной средней хордовой плотности  $\bar{n}_e = 4,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ : — — плотность электронов; ■ — распределение ядер углерода; ■ — распределение ядер кислорода

Полученный экспериментальный профиль концентрации ядер кислорода и углерода для данного разряда показан на рис. 5. Видно, что измеренные распределения концентрации ядер основных примесей плазмы — кислорода и углерода подобны профилю  $n_e(r)$  в основной части плазмы, т.е. соответствуют распределению  $Z_{\text{эф}}(r) = \text{const}$ .

Поскольку нейтральные пучки с энергией 30 кэВ редко находят применение в существующих вариантах CXRS-диагностик, можно было ожидать, что коэффициенты возбуждения CXRS-линий примесей могли не пройти достаточной эксперимен-

тальной проверки. Тем не менее в пределах ошибок измерений наблюдается совпадение экспериментально измеренных интенсивностей свечения CXRS-линий примесей с результатами моделирования данных свечений, полученных при использовании скоростных коэффициентов из базы атомных данных ADAS, что свидетельствует о достаточной применимости расчётных скоростных коэффициентов для условий токамака T-10.

## ИЗМЕРЕНИЯ ПРИМЕСНОГО СОСТАВА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА T-10

Измерения концентраций примесей с помощью CXRS-диагностики осуществлялись в ходе экспериментальных кампаний T-10 2013—2014 гг. По данным CXRS-диагностики можно утверждать, что в составе плазмы T-10 присутствуют две основные лёгкие примеси: углерод и кислород. Концентрации ядер углерода и кислорода, как правило, близки по величине и каждая из них составляет в зависимости от условий разряда от 2 до 3,5% от уровня концентрации электронов. При этом концентрация азота в плазме обычно мала и в нормальном случае составляет около 0,1—0,2% от  $n_e$ , кроме исключительного случая присутствия течи камеры токамака, когда концентрация азота поднималась до величины 1,5—2%. Оцененный с помощью CXRS уровень примесей в разрядах T-10 в пределах ошибок измерений согласуется с величинами эффективного заряда плазмы  $Z_{эф}$ , определёнными из абсолютной интенсивности тормозного континуума в видимой области.

После экспериментов 2014 г. осуществлена замена графитовых лимитеров на вольфрамовые и литиевые, что должно существенно сократить содержание лёгких примесей в плазме.

## ЭВОЛЮЦИЯ ПРОФИЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЯДЕР ПРИМЕСЕЙ В ОМИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ

В случае высокого тока в омических разрядах T-10 регулярно наблюдаются профили концентраций ядер лёгких примесей, подобные профилю плотности электронов, что соответствует распределению  $Z_{эф}(r) = \text{const}$ , как было показано на рис. 5 для тока плазмы 300 кА. Такое распределение примесей свидетельствует о доминирующем в этих условиях аномальном переносе плазмы, который значительно превышает неоклассический перенос.

В то же время в определённых условиях разряда на T-10, как и на ряде других токамаков, в определённых условиях разряда наблюдается эффект аккумуляции примесей в центре плазмы. Пикирование профилей концентраций примесей отмечалось в работах [19—22]. На рис. 6 показаны измеренные концентрации ядер кислорода и углерода в омическом разряде с током  $I_p = 180$  кА и плотностью  $\bar{n}_e = 3,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Видно, что в данном разряде профили концентрации ядер примесей  $n_C(r)$  и  $n_O(r)$  более пикированы, чем профиль  $n_e(r)$ . Аккумуляция у оси шнура лёгких примесей в разрядах с высокой плотностью и низким током регулярно наблюдалась в последних экспериментальных кампаниях T-10 с повышенным уровнем загрязнённости плазмы. Помимо CXRS-диагностики, аккумуляция примесей подтверждается диагностикой профилей тормозного континуума в видимой области, SXR-излучения и болометрическими измерениями. Наблюдаемое обострение профилей концентраций не противоречит данным с других установок и указывает на то, что при больших отношениях  $\bar{n}_e/I_p$  существенное влияние на поведение примесей оказывают неоклассические эффекты.

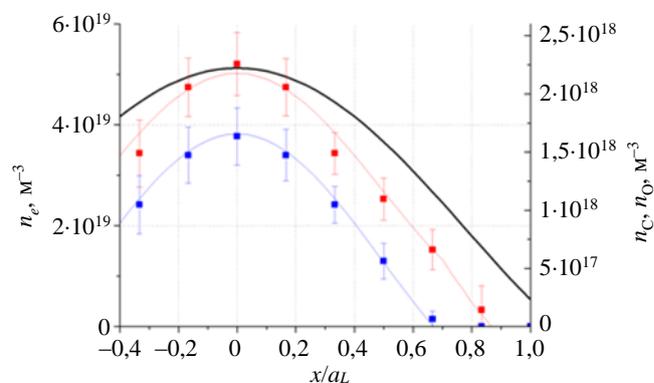


Рис. 6. Радиальное распределение измеренных концентраций ядер примесей в омическом разряде с током  $I_p = 180$  кА и величиной средней хордовой плотности  $\bar{n}_e = 3,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ : — — плотность электронов; ■ — распределение ядер углерода; ■ — распределение ядер кислорода

### ПОВЕДЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ ПРИ ЭЦР-НАГРЕВЕ

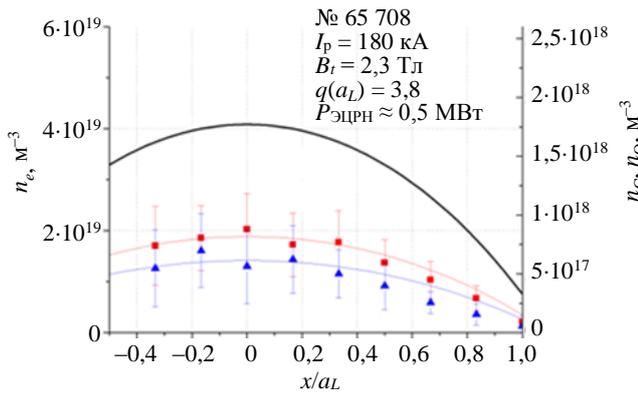


Рис. 7. Радиальное распределение измеренных концентраций ядер примесей в разряде с током  $I_p = 180$  кА и величиной средней хордовой плотности  $\bar{n}_e = 3,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  с введением центрального ЭЦР-нагрева мощностью  $P = 0,5$  МВт: — плотность электронов; ■ — распределение ядер углерода; ▲ — распределение ядер кислорода

При этом отсутствует пикирование примесей, содержание примесей в центре существенно ниже, чем на омической стадии. Таким образом, можно говорить об эффективном выносе примесей из центральной области плазмы при ЭЦР-нагреве в разрядах с исходной аккумуляцией примесей в омической стадии. Подобный эффект также наблюдался на других токамаках [24—26] и является важным для будущих термоядерных установок, так как демонстрирует возможность успешного использования ЭЦР-нагрева для предотвращения аккумуляции примесей у оси шнура.

Несмотря на очевидное ухудшение удержания примесей в центральной зоне, связанное с увеличением аномального переноса примесей при включении ЭЦР-нагрева, измерения турбулентности электронной плотности на Т-10 в схожих разрядах не показывают роста турбулентности в центральной зоне с включением ЭЦР-нагрева [27]. Изучение связи турбулентности плазмы и процессов переноса примесей будет являться направлением дальнейшего исследования на Т-10.

### ПРОФИЛИ ИСТОЧНИКОВ ЯДЕР В ОН- И ЭЦРН-РАЗРЯДАХ

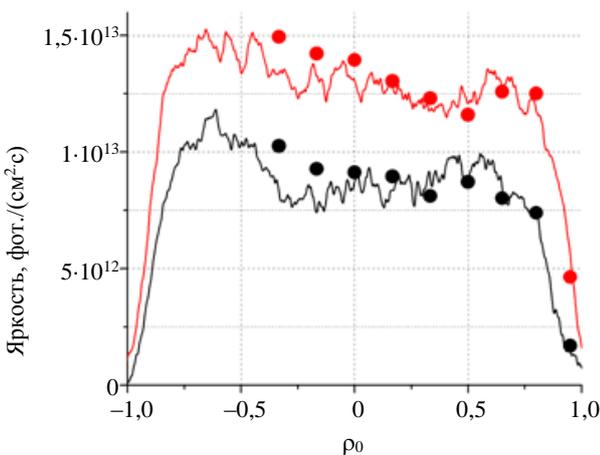


Рис. 8. Распределение яркости свечения линии Н-подобного иона углерода  $C^{5+}$  в разрядах с током  $I_p = 180$  кА и величиной средней хордовой плотности  $\bar{n}_e = 3,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ : ● — измерения с помощью CXRS-системы; — измерения с помощью сканирующей диагностики, установленной в сечении «В». Чёрный цвет соответствует измерениям в омической стадии, красный — в ЭЦРН-стадии

CXRS-диагностика Т-10 позволяет исследовать удаление ядер примесей при включении центрального ЭЦР-нагрева. В разрядах с центральным ЭЦР-нагревом концентрация ядер примесей в центральных областях плазмы уменьшается до 3 раз относительно значений в омической стадии разряда, при этом распределение концентрации лёгких примесей становится подобным профилю электронов. Экспериментальное изучение данного процесса на Т-10 приведено в работе [23].

На рис. 7 показан результат измерения профилей концентрации ядер кислорода и углерода в разряде, аналогичном по параметрам, представленным на рис. 6, но с центральным ЭЦР-нагревом мощностью 0,5 МВт. Профили концентрации ядер при ЭЦР-нагреве выположены относительно профилей, измеренных в омической стадии, показанных на

CXRS-диагностика предоставляет возможность одновременного измерения концентрации ядер примеси и интенсивности линий Н-подобных ионов данной примеси  $I_Z^H(r)$ , в величине которой заложена информация об ионизационном потоке  $\Gamma_Z^{\text{ion}}(r)$  в ядра примеси:

$$\Gamma_Z^{\text{ion}}(r) \sim I_Z^H(r) S_Z^{\text{ion}}(r) / Q_Z^H(r), \quad (2)$$

где  $S_Z^{\text{ion}}(r)$  — скоростной коэффициент ионизации Н-подобного иона;  $Q_Z^H(r)$  — скоростной коэффициент возбуждения данной линии Н-подобного иона.

На рис. 8 показаны профили яркости в шнуре линии Н-подобного иона углерода  $C^{5+}$  для ОН- и ЭЦРН-режимов с током 180 кА. Показаны профили, измеренные с помощью CXRS-диагностики, а также измеренные с помощью системы сканиру-

ющей диагностики [8]. Наблюдается хорошее согласие абсолютных величин и формы профилей излучения в разных сечениях токамака «D» и «B», удалённых друг от друга на 180° в тороидальном направлении, что свидетельствует о высокой однородности свечения C<sup>5+</sup> по всему тору. Одновременное получение в разряде данных о концентрации ядер примесей и их ионизационных источниках позволяет провести исследование различных характеристик переноса ядер — от интегрального времени их удержания в шнура до таких детальных параметров, как коэффициенты диффузии и конвективные скорости ядер в плазме.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕНОСА ЯДЕР

Для проведения детального исследования переноса частиц на уровне определения их коэффициентов диффузии и конвективных скоростей имеющиеся данные о стационарных профилях ядер и их источниках необходимо дополнить исследованием динамики указанных профилей, инициированной изменениями параметров разряда либо поступления примеси в разряд. Распространённым методом изменения поступления примеси является её инжекция в плазму в виде твёрдых частиц или газа.

В экспериментах на T-10 наряду с исследованиями переноса ядер собственных примесей C и O стационарными и динамическими методами проводились аналогичные исследования для инжектированных примесей He, Li, N и Ne. В качестве примера на рис. 9, а показано временное поведение параметров  $n_z(0)/n_e(0)$ , т.е. центральных содержаний ядер гелия, кислорода и углерода в разряде с током 200 кА, средней плотностью  $4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , тороидальным полем 2,3 Тл, ЭЦР-нагревом мощностью  $P_{\text{ECR}} \sim 1 \text{ МВт}$  на участке 600—900 мс и с инжекцией гелия на 700-й мс.

CXRS-измерения в указанном режиме проводились в повторяющихся разрядах на ОН и ЭЦРН-стадиях, а также на стадии инжекции гелия. При этом в одних разрядах измерялась одновременно концентрация ядер C и O, в других — C и He. Одновременно по центральной хорде измерялся временной ход свечения линии иона C<sup>5+</sup> (см. рис. 9, б), что позволяло контролировать мощность ионизационного потока в ядра углерода. Как видно на рис. 9, во временном поведении содержаний примесей в центре присутствуют три обособленных временных интервала:

— до 600-й мс в омической стадии разряда содержание кислорода и углерода в центре плазмы нарастает при том, что такие параметры плазмы, как ток, плотность и температура, выходят к 500-й мс на стационарные значения. Из этого следует, что на данном временном участке наблюдается процесс аккумуляции примесей у оси плазмы, характерный для разрядов с низким током и высокой плотностью плазмы;

— между 600-й и 700-й мс после включения центрального ЭЦР-нагрева происходит быстрый выброс ядер примесей из центральной зоны плазмы. В результате содержание ядер лёгких примесей в центре падает в ~2 раза, несмотря на существенное возрастание интенсивности линии C<sup>5+</sup>, а с ней и мощности источников ядер в плазме;

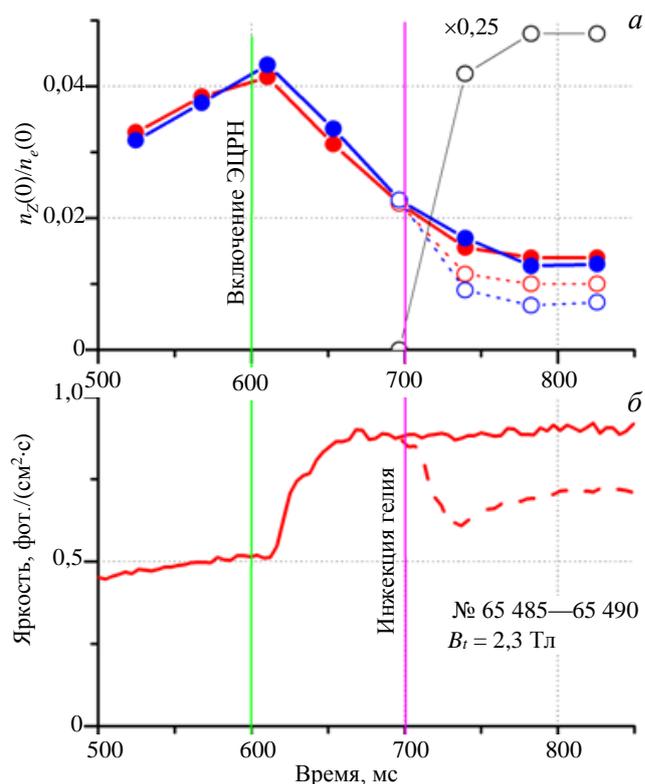


Рис. 9. Динамика относительного содержания ядер примесей углерода, кислорода и гелия в разрядах с током  $I_p = 200 \text{ кА}$  и величиной средней хордовой плотности  $\bar{n}_e = 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  с введением центрального ЭЦР-нагрева мощностью  $P = 1 \text{ МВт}$  на 600-й мс: ● — содержание ядер углерода; ● — содержание ядер кислорода; ○ — содержание ядер гелия; ○, ● — содержание ядер углерода и кислорода в случае инжекции гелия соответственно (а); временной ход яркости свечения водородоподобного иона углерода без инжекции гелия: - - - с инжекцией гелия (б)

— при исследовании поведения ядер инжектированной примеси важно учитывать влияние инъекции на параметры периферийной плазмы и связанное с этим изменение поступления рабочего газа и собственных примесей в разряд, а также обратное влияние этих процессов на поведение инжектированной примеси. Так, в ЭЦР-разрядах без инъекции гелия спад концентрации примесей в центре составляет обычно  $\sim 2,5$  раза относительно значений в омической стадии. В то же время, когда в плазму ЭЦР-нагревом после 700-й мс производится импульсная инъекция гелия, содержание собственных примесей в центре падает на уровень в 4 раза меньше, чем на омической стадии разряда. Вызвавшие этот эффект изменения параметров плазмы на периферии способны внести поправки в величину определяемого времени выхода концентрации гелия на стационарные значения в центре шнура ( $\tau_{\text{He}}^{\text{conf}} \sim 40$  мс на рис. 9).

Отметим, что в экспериментах на Т-10 с инъекцией неона и азота не наблюдается значительного падения концентрации собственных примесей. Возможно, это отличие связано с тем, что инъекция гелия существенно увеличивает излучение на самой периферии шнура, эффективно снижая взаимодействие плазмы со стенками и лимитерами токамака.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье экспериментальные результаты демонстрируют широкие возможности модернизированной CXRS-диагностики Т-10 как по развитию методики CXRS-измерений, так и по исследованию физических процессов, протекающих в плазме токамака.

Проведено сравнение профилей ионной температуры по уширению CXRS-линий ядер различных сортов примесей. Измеренные профили совпадают в пределах погрешности. Данный результат подтверждает правильность проведения CXRS-измерений и используемых методов обработки экспериментальных данных.

Реализована методическая возможность одновременного измерения в рамках CXRS-диагностики профилей концентрации ядер примеси и их ионизационных источников, что позволяет проводить исследование как интегрального времени удержания ядер в плазме  $\tau_Z^{\text{conf}}$ , так и детальных характеристик переноса ядер — их коэффициентов диффузии и конвективных скоростей.

Проведены измерения примесного состава плазмы Т-10, показывающие, что в экспериментах 2013—2014 гг. в токамаке присутствуют две доминирующие примеси — углерод и кислород, которые обычно имеют близкие величины концентраций и обеспечивают величину эффективного заряда в плазме на уровне  $Z_{\text{эф}} \sim 3\text{—}4$ . Величины  $Z_{\text{эф}}$  близки в пределах ошибок к получаемым из абсолютной интенсивности тормозного континуума в видимой области.

Показана необходимость учёта влияния инжектированной примеси на параметры периферийной плазмы при исследовании поведения инжектированных и собственных примесей.

Установлен факт пикирования профилей концентраций примесей у оси шнура в ОН-разрядах с высокими плотностями плазмы и малыми значениями тока в условиях высокого содержания примесей. Данный эффект может быть связан с превышением неоклассического переноса над аномальными транспортными процессами.

Продемонстрирован эффект выноса примесей из центра плазмы при ЭЦР-нагреве, наиболее эффективный в случае предварительной пикировки примесей в омической стадии разряда.

CXRS-диагностика обеспечивает получение экспериментальных данных, которые необходимы для проведения исследований турбулентности и переноса энергии и частиц на Т-10. Детальные измерения параметров плазмы с помощью CXRS необходимы при проведении исследований свойств геодезических акустических мод (ГАМ) плазменных колебаний. ГАМ могут оказывать значительное влияние на аномальный транспорт в плазме токамака [28], при этом закономерности их возникновения и развития, а также их основные свойства напрямую связаны с профилями ионной температуры и концентрации примесей в плазме [29—31].

Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00193).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

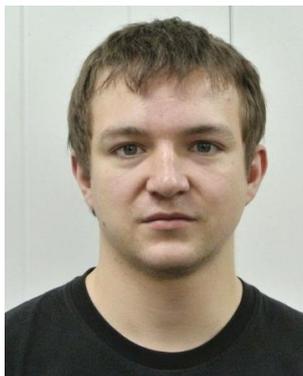
1. **Крупин В.А. и др.** — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, вып. 4, с. 60—70.
2. **Besparmyatnov I.O. et al.** — Review of Scientific Instruments, 2010, vol. 81, p. 10D709.
3. **Weisen H., von Hellermann M., Boileau A. et al.** — Nuclear Fusion, 2011, vol. 29, p. 2187.
4. **Viezzer E., Pütterich T., Dux R., McDermott R.M.** — Review of Scientific Instruments, 2012, vol. 83, p. 103501.
5. **Coenen J.W. et al.** — J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2010, vol. 43, p. 144015.
6. **E. Delabie.** Neutral beam driven hydrogen spectroscopy in fusion plasmas. Doctoral degree, Technische Universiteit Eindhoven, 2011. 116 p.
7. **Melnikov A.V. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2006, vol. 48, p. S87.
8. **Крупин В.А., Немец А.Р., Ключников Л.А., Коробов К.В., Нургалиев М.Р., Науменко Н.Н., Тугаринов С.Н.** — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 1, с. 80—93.
9. **Krupin V. et al.** — In: 12th European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics. Budapest, 2—6 September 1985, p. 207—210.
10. **Кирнева Н.А. и др.** — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 1, с. 56—61.
11. **Grierson B. A. et al.** — Review of Scientific Instruments, 2012, vol. 83, p. 10D529.
12. **Dux R. et al.** — In: 39th EPS Conf. & 16th Intern. Congress on Plasma Physics, 2012, P2.049.
13. **Klyuchnikov L.A. et al.** — Ibid., P1.090.
14. **Heidbrink W.W. et al.** — Commun. Comput. Phys., 2011, vol. 10, № 3, p. 716—741A.
15. **Melnikov A.V. et al.** — Nuclear Fusion, 2011, vol. 51, p. 083043.
16. **Melnikov A.V. et al.** — Ibid., 2015, vol. 55, p. 063001.
17. **Melnikov A.V. et al.** — Ibid., 2013, vol. 53, p. 093019.
18. **The Atomic Data and Analysis Structure (ADAS):** <http://www.adas.ac.uk/>.
19. **Giroud C. et al.** — Review of Scientific Instruments, 2008, vol. 79, p. 10F525.
20. **Dux R. et al.** — Nuclear Fusion, 2004, vol. 44, p. 260.
21. **Neu R. et al.** — Ibid., 2005, vol. 45, p. 209.
22. **Rowan W.** — Ibid., 2008, vol. 48, p. 105005.
23. **Klyuchnikov L.A. et al.** — In: Proc. 25th IAEA FEC. St. Petersburg, 13—18 October 2014. EX/P1-44.
24. **Fable E.** Experimental and theoretical study of particle transport in the TCV tokamak. Doctoral degree, Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, 2009. 132 p.
25. **Fujita T.** — Nuclear Fusion, 2003, vol. 43, p. 1527.
26. **Sertoli M. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2011, vol. 53, p. 035024.
27. **Vershkov V. et al.** — Nuclear Fusion, 2015, vol. 55, p. 063014.
28. **Gurchenko A.D. et al.** — Europhysics Letters, 2015, vol. 110, p. 55001.
29. **Gusakov E.Z. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2013, vol. 55, p. 124034.
30. **Yang Sh.Ch. et al.** — Physics of Plasmas, 2015, vol. 22, p. 044502.
31. **Gurchenko A.D. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2013, vol. 55, p. 085017.



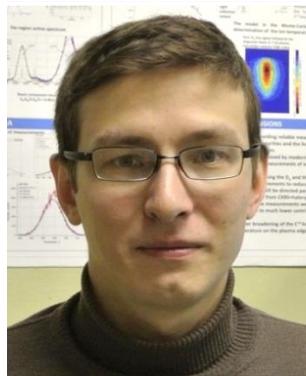
Леонид Александрович Ключников, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
lklyuchnikov@list.ru



Вадим Александрович Крупин, в.н.с, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Кирилл Вячеславович Коробов, м.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Максим Ринатович Нургалиев, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Антон Ролланович Немец, м.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
Nemets\_AR@nrcki.ru



Алексей Юрьевич Днестровский, ведущий инженер, к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
dnestrov0@gmail.com



Николай Николаевич Науменко, с.н.с., лауреат Государственной премии, премии Ленинского комсомола в области науки и техники; Институт физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, пр-т Независимости 68, Республика Беларусь



Сергей Николаевич Тугаринов, с.н.с., руководитель работ по разработке CXRS-диагностики для ИТЭР; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Станислав Вадимович Серов, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Дмитрий Сергеевич Денщикова, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия

Статья поступила в редакцию 12 августа 2015 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 1, с. 95—104.