

УДК 533.9.082

КОМПЛЕКС СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АБСОЛЮТНОЙ ВЕЛИЧИНЫ И РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ЗАРЯДА ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ Т-10

В.А. Крупин¹, А.Р. Немец¹, Л.А. Ключников¹, К.В. Коробов¹, М.Р. Нургалиев¹, Н.Н. Науменко², С.Н. Тугаринов³

¹Отделение токамаков, НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Институт физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

³Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

Величина эффективного заряда $Z_{\text{эф}}$ в плазме токамака оказывает значительное влияние на процессы нагрева, удержания и устойчивости плазмы. Работа содержит описание диагностического комплекса, развитого на Т-10 для определения величины и профиля эффективного заряда $Z_{\text{эф}}(r)$ в плазме из измерений абсолютной величины и хордового профиля интенсивности тормозного континуума (непрерывного спектра тормозного излучения) в видимой области спектра. В состав диагностического комплекса входят системы оперативной оценки абсолютного уровня континуума в разряде, а также многохордовые системы измерения профиля интенсивности континуума, дополненные в эксперименте пространственно-временной сканирующей диагностикой профиля континуума. Все системы имеют абсолютную калибровку, при этом каждая из диагностик обладает своими преимуществами в виде высокого спектрального, временного либо пространственного разрешения, взаимно дополняя друг друга. Рассмотрены вопросы, связанные с методикой определения $Z_{\text{эф}}$ из излучения тормозного континуума в видимой области спектра. Приведены примеры совместной работы диагностик комплекса по измерению абсолютной величины, профиля и динамики $Z_{\text{эф}}$ в разряде, которые демонстрируют важность получаемых данных для исследования физических процессов в плазме. Созданный комплекс диагностик величины $Z_{\text{эф}}$ обеспечивает необходимые данные для исследования переноса плазмы и физики квазикогерентных мод плазменных колебаний, таких, как геодезические акустические моды (ГАМ) и альфвеновские собственные моды на токамаке Т-10.

Ключевые слова: токамак Т-10, спектроскопия, эффективный заряд, $Z_{\text{эф}}$, ГАМ.

THE COMPLEX OF SPECTROSCOPIC DIAGNOSTICS FOR ABSOLUTE VALUE AND PROFILE MEASUREMENTS OF THE EFFECTIVE CHARGE ON T-10

V.A. Krupin¹, A.R. Nemets¹, L.A. Klyuchnikov¹, K.V. Korobov¹, M.R. Nurgaliev¹, N.N. Naumenko², S.N. Tugarinov³

¹Department of Tokamaks, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²Institute of Physics National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

³Institution «Project Center ITER», Moscow, Russia

The effective charge Z_{eff} value affects heating processes, confinement and plasma stability. The paper contains description of the diagnostic complex developed on T-10 for determination of value and profile of $Z_{\text{eff}}(r)$ by visible bremsstrahlung measurements. The diagnostic complex includes the system aimed at fast estimation of the bremsstrahlung absolute value, multi-lines of sight systems for bremsstrahlung profile measurements, and the radial scanning system. All systems are absolute calibrated. Each of system has its advantages: spectral, temporal, or spatial resolution, complementing others. Methodical questions of determination Z_{eff} via bremsstrahlung in visible spectral range are considered. Joint work of all systems is shown on examples of measured values, profiles and dynamics of Z_{eff} , which confirm importance of Z_{eff} data for the plasma physics processes investigation. The effective charge diagnostic complex provides required data for investigation of the plasma transport and the physics of quasi-coherent modes of plasma oscillations, such as geodesic acoustic modes (GAM) and Alfvén eigenmodes on T-10 tokamak.

Key words: tokamak T-10, spectroscopy, effective charge, Z_{eff} , GAM.

ВВЕДЕНИЕ

Величина $Z_{\text{эф}}$ характеризует уровень загрязнённости плазмы ионами различных сортов примесей и задаётся следующим выражением [1]:

$$Z_{\text{эф}} = \frac{\sum_i n_i Z_i^2}{\sum_i n_i Z_i}, \quad (1)$$

где n_i — концентрация ионного компонента плазмы с зарядом Z_i . При этом в условиях Т-10 доминирующий вклад в величину и профиль $Z_{\text{эф}}(r)$ вносят ядра лёгких примесей, таких, как С, N, O и др.

Интерес к развитию и улучшению методик измерения эффективного заряда обусловлен его существенным влиянием на многие процессы в плазме токамака. Увеличение абсолютной величины $Z_{\text{эф}}$ в

плазме сопровождается возрастанием эффективности нагрева электронов [2], а также увеличением роли неоклассических процессов (при снижении роли аномальных) в формировании переноса ионов, что способно вызвать аккумуляцию примесей у оси шнура, а с ней — обострение профиля $Z_{\text{эф}}(r)$ [3]. В то же время профиль $Z_{\text{эф}}(r)$ прямо участвует в формировании профиля плотности тока, а через него влияет на процессы нагрева, удержания и устойчивости плазмы.

В данной статье, кроме решения методических вопросов, связанных с надёжным определением величины и профиля $Z_{\text{эф}}(r)$, продемонстрирована возможность использования данных по $Z_{\text{эф}}(r)$ для исследования физических задач, связанных с переносом ядер лёгких примесей в плазме и их влиянием на параметры разряда токамака.

В настоящее время на токамаках преимущественно используются два метода измерения $Z_{\text{эф}}(r)$:

— из профилей интенсивности тормозного континуума (непрерывного спектра тормозного излучения) плазмы $I_{\text{бр}}(r)$ в видимой области спектра 4000—7000 Å [4—7];

— с помощью активной диагностики CXRS (Charge Exchange Recombination Spectroscopy), измеряющей профили концентрации ядер примесей в шнуре [8].

Оценка величины $Z_{\text{эф}}$ также может быть выполнена из интенсивности континуума плазмы $I_{\text{свр}}(r)$ в мягкой рентгеновской области 2—10 кэВ [9] и из проводимости плазмы [5].

В видимой области спектра 4000—7000 Å непрерывное излучение горячей плазмы ($T_e > 10$ эВ) представлено, в основном, тормозным континуумом, который на несколько порядков интенсивнее рекомбинационного и планковского излучения. В чисто дейтериевой (или водородной) плазме, где величина эффективного заряда $Z_{\text{эф}} = 1$, для интенсивности тормозного континуума можно записать

$$I_{\text{бр}}^{\text{D}}(r) = \frac{1,9 \cdot 10^{-28}}{4\pi} \frac{n_e^2(r) g_{\text{ffD}}(r)}{\lambda^2 \sqrt{T_e(r)}} \exp\left(-\frac{E_f}{T_e(r)}\right), \text{ Вт}/(\text{см}^3 \cdot \text{ср} \cdot \text{Å}), \quad (2)$$

где λ — длина волны излучения, Å; $n_e(r)$ — радиальный профиль электронной плотности, м^{-3} ; $T_e(r)$ — профиль температуры электронов, эВ; $g_{\text{ffD}}(r) = g_{\text{ff}}(Z_i = 1, T_e(r), E_f)$ — профиль фактора Гаунта для свободно-свободных переходов электрона, тормозящегося на дейтоне (в общем случае фактор Гаунта зависит от заряда ионов $Z_i \geq 1$, температуры электронов и энергии фотонов E_f , эВ (см. Приложение)). Поскольку энергия фотонов в видимой области спектра ограничена значением $E_f \leq 3$ эВ, то величина отношения E_f/T_e всегда мала ($\ll 1$), а экспоненциальный член в формуле (2) близок к единице практически во всём сечении шнура.

Интенсивность тормозного континуума для многокомпонентной плазмы имеет вид

$$I_{\text{бр}}(r) = I_{\text{бр}}^{\text{D}}(r) \sum_i \frac{n_i(r) Z_i^2 g_{\text{ff}Z_i}(r)}{n_e(r) g_{\text{ffD}}(r)}, \quad (3)$$

где $n_i(r)$ и $g_{\text{ff}Z_i}(r) = g_{\text{ff}}(Z_i, T_e(r), E_f)$ — профили концентраций и гаунт-факторов всех ионных компонентов плазмы соответственно. Для случая одной примеси с зарядом Z связь между профилями эффективного заряда $Z_{\text{эф}}(r)$ и тормозного континуума $I_{\text{бр}}(r)$ может быть представлена в виде

$$Z_{\text{эф}}(r) = 1 + \frac{I_{\text{бр}}(r)/I_{\text{бр}}^{\text{D}}(r) - 1}{\delta_{\text{ZD}}}, \quad (4)$$

где $\delta_{\text{ZD}}(r) = \frac{1}{Z-1} [Z(g_{\text{ff}Z}(r)/g_{\text{ffD}}(r)) - 1]$.

При большем числе примесей для связи между $Z_{\text{эф}}(r)$ и $I_{\text{бр}}(r)$ можно составить выражение, качественно похожее на (4), но содержащее дополнительные соотношения концентраций ядер разных сортов примесей. Некоторые вопросы, связанные с гаунт-факторами для рабочего газа и примесей, обсуждены в Приложении.

Как видно из формул (3), (4), для экспериментального определения абсолютной величины и профиля $Z_{\text{эф}}(r)$ необходимо измерить $n_e(r)$, $T_e(r)$ и хордовый профиль яркости континуума $J_{\text{бр}}(x)$. Величина $J_{\text{бр}}(x)$ является интегралом интенсивности $I_{\text{бр}}(r)$ вдоль данной хорды наблюдения. После чего требуется вос-

становить радиальное распределение $I_{br}(r)$, воспользовавшись одним из методов абелизации [10], либо рассчитать $J_{br}(x)$, используя измеренные профили $n_e(r)$, $T_e(r)$ и предполагаемое распределение $Z_{эф}(r)$, а затем, варьируя $Z_{эф}(r)$, минимизировать отклонения расчётного профиля $J_{br}(x)$ от измеренного в эксперименте. В работе преимущественно использовался последний метод.

Отметим, что точность определения $Z_{эф}$ из интенсивности тормозного континуума существенно зависит от точности измерений профиля $n_e(r)$ и слабо зависит от точности определения параметра $T_e(r)$ (с учётом температурной зависимости гаунт-факторов: $I_{br}(r) \sim T_e(r)^{-(0,25-0,3)}$).

Следует отметить, что в условиях токамака при $T_e(0) \geq 1$ кэВ концентрация ядер лёгкой примеси на порядок превышает суммарную концентрацию всех остальных её зарядовых состояний, в результате ядра лёгких примесей дают основной вклад в величину $Z_{эф}$. В сравнении с лёгкими примесями вклад тяжёлых примесей, таких, как Fe, в величину $Z_{эф}$ и интенсивность тормозного континуума I_{br} в условиях Т-10 крайне мал. Причина этого в том, что ионы тяжёлых примесей, обладая высоким зарядом Z_i , являются эффективными излучателями линейчатого излучения, интенсивность которого растёт с зарядом иона пропорционально $\sim Z_i^4$, тогда как вклад тяжёлых ионов в I_{br} растёт, как Z_i^2 , т.е. в сотни раз слабее роста их линейчатого излучения. В результате даже при предельно высоком уровне концентрации тяжёлой примеси, когда она окажется способной вынести с линейчатым излучением всю энергию, вложенную в разряд токамака, она не может внести заметного вклада в величину $Z_{эф}$.

Как правило, суммарная интенсивность линейчатого излучения атомов и ионов в видимой области спектра на порядки превосходит тормозное излучение плазмы, поскольку скоростной коэффициент возбуждения тормозного континуума существенно ниже коэффициентов возбуждения линейчатого излучения. Поэтому для измерения интенсивности континуума используются выделенные участки спектра (так называемые «континуумные окна»), в которых отсутствуют линии атомов и ионов примесей и рабочего газа. Впервые наличие таких участков в спектре плазмы было показано в работе [11]. Отметим, что присутствие конкретных «окон» в спектре определяется примесным составом плазмы. В то же время любой участок спектра в видимой области, в том числе и в «континуумных окнах», содержит плотный спектр линейчатого излучения молекул рабочего газа H_2 или D_2 , затрудняющий измерение уровня континуума.

В экспериментах на Т-10 были обнаружены различные «континуумные окна» в видимой области. Так, в условиях, когда основной примесью плазмы на Т-10 являлся углерод, в качестве «окон» были выделены следующие участки спектра: $4976 \pm 5 \text{ \AA}$, $5236 \pm 6 \text{ \AA}$, $5360 \pm 7 \text{ \AA}$, $6017 \pm 5 \text{ \AA}$, $6177 \pm 10 \text{ \AA}$, $6224 \pm 6 \text{ \AA}$, $6324 \pm 6 \text{ \AA}$, $7078 \pm 5 \text{ \AA}$, $7444 \pm 11 \text{ \AA}$, расположенные на достаточном удалении от ярких спектральных линий атомов и ионов. Каждое из этих «окон» характеризуется различной шириной спектра, свободного от линий атомов и ионов, и различным соотношением интенсивностей молекулярных линий и тормозного континуума. Кроме примесного состава, на выбор оптимального «континуумного окна» влияют параметры применяемого спектрального оборудования и регистрирующей аппаратуры. Для Т-10 по совокупности параметров самой оптимальной оказалась зона $5236 \pm 6 \text{ \AA}$, используемая на многих других установках с магнитным удержанием.

Экспериментальным способом определения вклада молекулярного излучения в «окне» является измерение спектра с высоким разрешением ($\sim 0,1-0,2 \text{ \AA}$), что обеспечивает надёжное измерение континуума в интервалах между разрешёнными молекулярными линиями. Кроме того, используемый спектральный прибор должен обладать низким уровнем рассеянного света, чтобы его добавление к континууму не приводило к заметному искажению измеряемых значений $Z_{эф}$.

При наличии на границе шнура излучения пристеночного рекомбинационного континуума, планковского излучения диафрагм и диверторных пластин, а также таких источников периферийного свечения, как «marfe» (от multifaceted asymmetric radiation from the edge) [12], характеризуемых повышенным уровнем тормозного и рекомбинационного континуума, желательно использовать измерения профилей континуума с нескольких ракурсов для выделения указанных континуумных засветок.

В отсутствие измерений континуума с нескольких ракурсов хорды его регистрации не должны пересекать районы диафрагм, диверторных зон, областей газонапусков и систем дополнительного нагрева. Для подавления излучений, отражённых от стенок камеры, необходимо использовать специальные ловушки света, применение которых обязательно в установках с дивертором и бампер-лимитером.

Обязательным условием проведения абсолютных измерений $Z_{эф}$ является выполнение абсолютной калибровки систем измерения континуума с использованием калиброванных источников излучения, желательно методом *in situ*. На Т-10 для абсолютной калибровки применяются такие источники, как калибровочные лампы накаливания СИРШ 6-100, сертифицированные во ВНИИОФИ, а также калибровочный источник Labsphere USS-600С, сертифицированный в NIST.

Представляемая работа содержит:

- описание диагностического комплекса, развитого для измерения тормозного континуума на Т-10;
- рассмотрение методических вопросов, связанных с определением $Z_{эф}$ из излучения континуума;
- демонстрацию экспериментальных возможностей комплекса по определению абсолютных величин и пространственных распределений $Z_{эф}$ в плазме Т-10.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ $Z_{эф}$ НА Т-10

Созданный на установке Т-10 диагностический комплекс, предназначенный для измерений профилей и величин $Z_{эф}$ из абсолютной интенсивности тормозного континуума, расположен в двух диагностических сечениях токамака (условно обозначенных «В» и «D») и включает в себя следующие измерительные системы (рис. 1):

- «быстрые» каналы регистрации интегрального излучения в области $5236 \pm 6 \text{ \AA}$ — система измерения интегрального излучения в «континуумном окне» $5236 \pm 6 \text{ \AA}$ по двум фиксированным хордам наблюдения, проходящим в сечении «D» через центр плазменного шнура под углами 30° и -4° к экваториальной плоскости тора. В схеме измерения задействованы монохроматоры МДР-2 с дисперсией 20 \AA/мм и апертурным углом $1/2$ с ФЭУ в качестве детекторов;

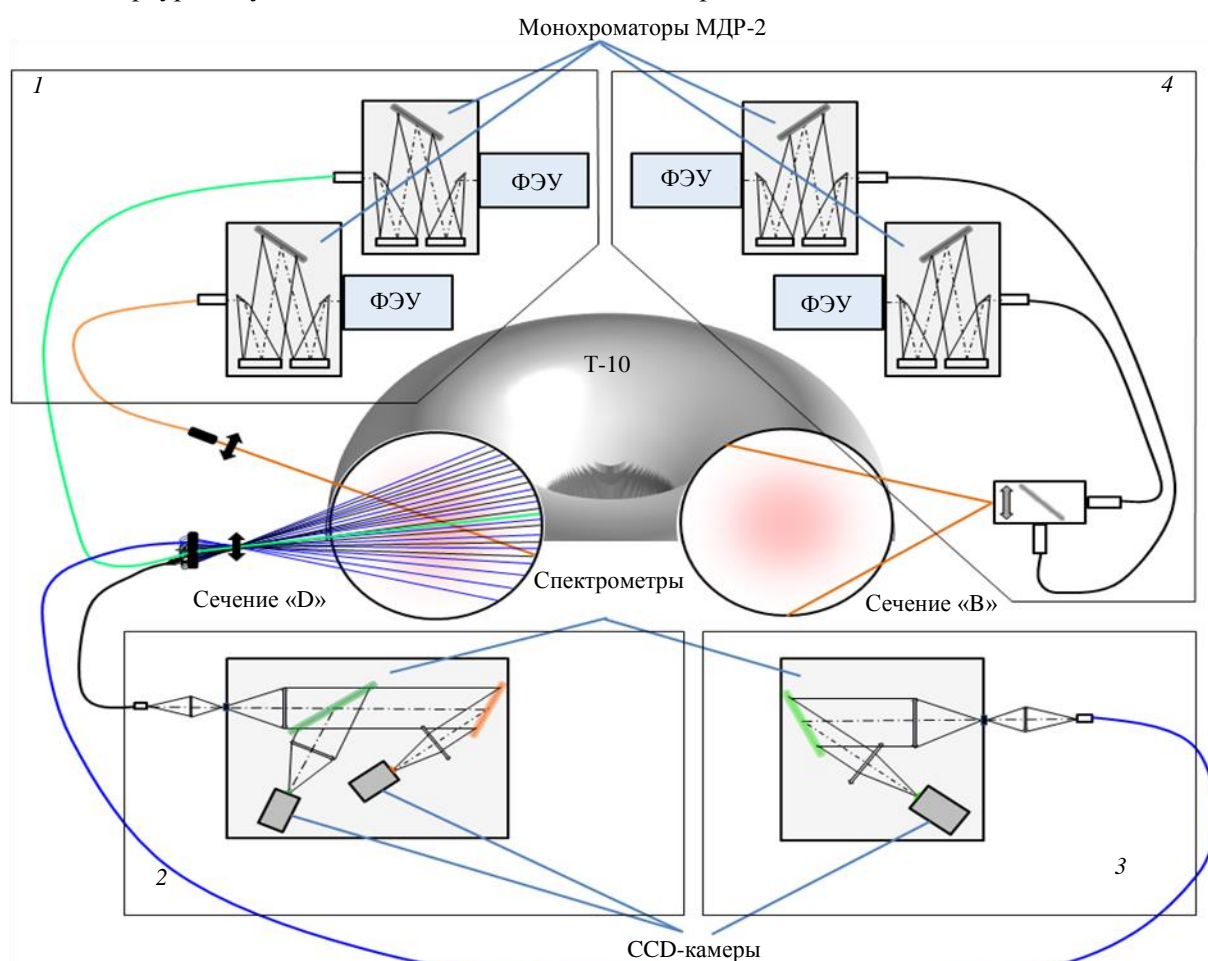


Рис. 1. Схема комплекса диагностик $Z_{эф}$ на Т-10: 1 — «быстрые» каналы регистрации интегрального излучения в области $5236 \pm 6 \text{ \AA}$; 2 — многохордовая система регистрации спектров в районе 5291 \AA с высоким временным разрешением; 3 — многохордовая система регистрации спектров в районе 5236 \AA с высоким спектральным разрешением; 4 — сканирующая диагностика профиля интегрального излучения в области $5236 \pm 6 \text{ \AA}$

— многохордовая система регистрации спектров в районе 5291 \AA с высоким временным разрешением. Расположенная в сечении «D» многохордовая система измерения спектров излучения вблизи длины волны 5291 \AA позволяет одновременно регистрировать девять спектров излучения по хордам, расположенным равномерно через 5 см от -10 (под экваториальной плоскостью) до 30 см (над экваториальной плоскостью) по малому радиусу. В схеме использован светосильный спектрометр с дифракционной решёткой 3300 штр./мм и EMCCD-камера PhotonMax 512B;

— многохордовая система регистрации спектров в районе 5236 \AA с высоким спектральным разрешением [13]. Система, собранная в сечении «D», позволяет одновременно регистрировать 13 спектров излучения по хордам, расположенным в интервале от -15 до 33 см по малому радиусу при радиусе рельсового лимитера 30 см . В схеме задействованы стигматический эшелле-спектрометр HES-370 с дисперсией $3,9 \text{ \AA/мм}$ и апертурным углом $1/3,2$ и CCD-камера Pixis 512B;

— сканирующая диагностика профиля интегрального излучения в области $5236 \pm 6 \text{ \AA}$ [14] — система измерения пространственных профилей интегрального излучения «континуумного окна» $5236 \pm 6 \text{ \AA}$, а также ещё одного выбранного участка спектра, с помощью вращающегося зеркального барабана, смонтированная в сечении «B». Излучение, собранное вдоль сканирующей хорды наблюдения, с помощью полупрозрачного зеркала разводится на два монохроматора, снабжённых ФЭУ.

Цель использования набора диагностик для измерения $Z_{эф}$ — дополнить характеристики каждой отдельной диагностической системы наиболее выигрышными параметрами остальных систем комплекса. Сравнение величин пространственных, спектральных и временных разрешений диагностик приведено в таблице.

Сравнение величин пространственных, спектральных и временных разрешений диагностик

Диагностика континуума	Временное разрешение	Пространственное разрешение	Спектральное разрешение
«Быстрые» каналы регистрации интегрального излучения в области $5236 \pm 6 \text{ \AA}$	10^{-2} мс	$3-4 \text{ см}$	12 \AA
Сканирующая диагностика профиля интегрального излучения в области $5236 \pm 6 \text{ \AA}$	$10-30 \text{ мс}$	$\leq 1 \text{ см}$	12 \AA
Многохордовая система регистрации спектров в районе 5236 \AA с высоким спектральным разрешением	$50-100 \text{ мс}$	$1-2 \text{ см}$	$0,2 \text{ \AA}$
Многохордовая система регистрации спектров в районе 5291 \AA с высоким временным разрешением	$1-4 \text{ мс}$	$1-2 \text{ см}$	$1,5 \text{ \AA}$

Отметим, что использование столь расширенного комплекса для регистрации излучения тормозного континуума связано с высокими требованиями, предъявляемыми к точности и надёжности данных о $Z_{эф}(r)$. В эксперименте данный комплекс задействован совместно с CXRS-диагностикой ядер примесей в программах по исследованию переноса лёгких примесей, что требует детальных данных о профилях концентрации примесей. Учитывая высокую точность данных о скоростном коэффициенте возбуждения тормозного континуума, можно рассчитывать на надёжное определение абсолютных значений заряда $Z_{эф}$, а с ним и суммарной концентрации примесей из интенсивности континуума. Регулярное сравнение данных CXRS-измерений с данными о поведении примесей из интенсивности тормозного континуума позволяет значительно повысить надёжность получаемых результатов.

«БЫСТРЫЕ» КАНАЛЫ РЕГИСТРАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ $5236 \pm 6 \text{ \AA}$

Для быстрых измерений интенсивности излучения в «континуумном окне» $5236 \pm 6 \text{ \AA}$ используются два абсолютно калиброванных канала регистрации по центральным хордам наблюдения в сечении «D». В состав диагностики входят две системы сбора света с апертурным углом $1/2$ и направлением оптических осей под углами 30° и -4° к экваториальной плоскости, два световода из кварц-полимерных волокон диаметром 100 мкм , полным сечением $1 \times 10 \text{ мм}$, длиной 5 м и числовой апертурой $\sim 0,5$, два монохроматора с апертурным углом $1/2$ и два ФЭУ в качестве детектора.

Следует отметить малый уровень рассеянного света в используемых монохроматорах МДР-2. Для оценки влияния этого уровня на качество измерений континуума данные измерения проводились в нескольких вариантах: с использованием двух спаренных монохроматоров МДР-2 (т.е. в варианте двойно-

го монохроматора), с одним монохроматором МДР-2 и интерференционным фильтром на 5236 \AA и с одним монохроматором МДР-2 без фильтра. Данное сравнение показало, что заметного различия в измеряемых величинах $Z_{\text{эф}}$ не наблюдается, т.е. дополнительная монохроматизация прибора МДР-2 приводит только к потерям полезного сигнала. В результате все последующие измерения континуума на Т-10 выполнялись с использованием монохроматора МДР-2 без фильтра.

Абсолютные измерения континуума по каналу под углом -4° используются для абсолютной калибровки в разряде 13-хордовой системы измерения профиля интенсивности континуума, а также для оперативного обнаружения MARFE, возникающего в разрядах Т-10 с малым током при высокой плотности плазмы на периферии шнура со стороны сильного поля и локализованного несколько выше экваториальной плоскости тора при обычном направлении тороидального поля. Приведённое на рис. 2 сравнение сигналов двух каналов регистрации (-4 и 30) демонстрирует увеличение излучения по хорде -4° после 800-й мс разряда, вызванное нарастанием свечения MARFE. Отметим, что другие источники полоидальной асимметрии излучения, связанные, например, с источниками нагрева или клапанами напуска газа, в данном диагностическом сечении отсутствуют.

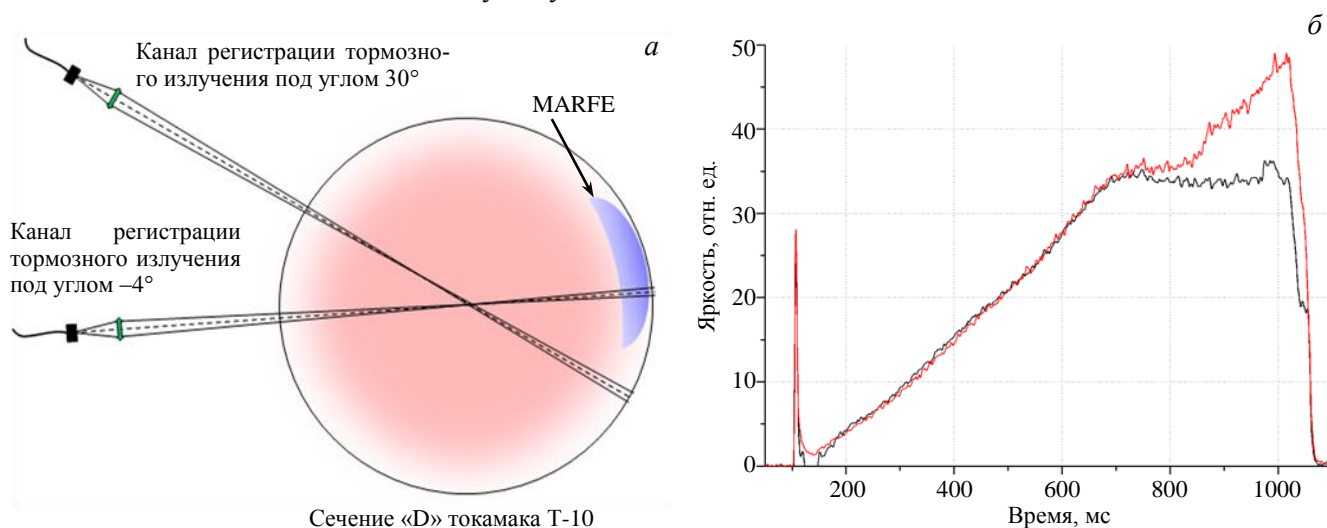


Рис. 2. Расположение каналов наблюдения тормозного континуума на Т-10 (а) и динамика тормозного излучения по двум каналам наблюдения: — -4° , — 30° (б)

Высокое временное разрешение хордовых каналов позволяет проследить динамику быстрых изменений интенсивности континуума.

Рис. 3 демонстрирует качественное различие в характере поведения континуума в разрядах с электронно-циклотронным резонансным нагревом (ЭЦРН) при разной величине плотности плазмы.

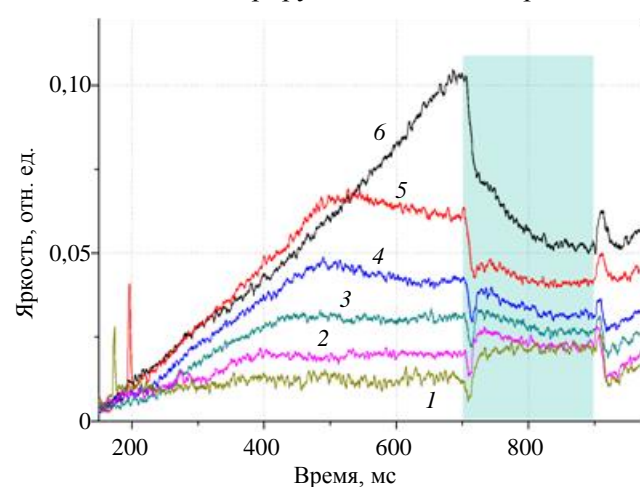


Рис. 3. Динамика интенсивности тормозного континуума в разрядах № 63 332—63 336 с током 180 кА и различной средней плотностью. Электронно-циклотронный резонансный нагрев (ЭЦРН) работает в интервале 700—900 мс: $\bar{n}_e = 1,4 \cdot 10^{19}$ (1), $2,0 \cdot 10^{19}$ (2), $2,6 \cdot 10^{19}$ (3), $3,1 \cdot 10^{19}$ (4), $3,7 \cdot 10^{19}$ (5), $4,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (6)

На рисунке видно, как при фиксированном токе разряда $I_p = 180 \text{ кА}$ по мере увеличения плотности плазмы до предельных значений $\bar{n}_e \sim 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ усиливается глубина распада интенсивности континуума в первые 20—30 мс после включения центрального (внутри $r = r_s$, где r_s — радиус переворота фазы пилообразных колебаний) ЭЦР-нагрева мощностью $\sim 1 \text{ МВт}$. Данный эффект предположительно связан с более эффективным удалением ядер лёгких примесей из центра шнура при включении ЭЦРН по мере перехода к разрядам с увеличенным отношением n_e/I_p [15].

Важной задачей измерения континуума по центральной хорде является проведение экспресс-оценки величины $Z_{\text{эф}}$ в предположении об однород-

ном распределении эффективного заряда $Z_{\text{эф}}(r) = Z_{\text{эф}}^{\text{const}}$ по сечению шнура. Выражение для определения однородной величины $Z_{\text{эф}}^{\text{const}}$ из яркости излучения континуума по центральной хорде $J_{\text{бр}}^{\text{exp}}(0)$ в случае одной лёгкой примеси с зарядом ядра Z имеет вид

$$Z_{\text{эф}}^{\text{const}} = 1 + \frac{J_{\text{бр}}^{\text{exp}}(0) - \int_{-a_i}^{a_i} I_{\text{бр}}^{\text{D}}(r) dr}{\int_{-a_i}^{a_i} I_{\text{бр}}^{\text{D}}(r) \delta_{\text{ZD}}(r) dr}. \quad (5)$$

Интенсивность $I_{\text{бр}}^{\text{D}}$ рассчитывается из формулы (2) с использованием экспериментальных значений $n_e(r)$ и $T_e(r)$. Оценка $Z_{\text{эф}}^{\text{const}}$ особенно надёжна при измерениях континуума по центральной хорде, где отношение молекулярных линий к интенсивности тормозного континуума мало.

Исследование поведения эффективного заряда в предположении однородного распределения $Z_{\text{эф}}(r)$ можно считать оправданным, так как в большинстве режимов работы Т-10 профиль $Z_{\text{эф}}(r)$ практически однороден по сечению шнура. В разрядах с величиной $Z_{\text{эф}}^{\text{const}} \sim 2,5\text{—}4$ и высокими отношениями \bar{n}_e/I_p возникает заметное обострение профилей $Z_{\text{эф}}(r)$, что приводит к дополнительному увеличению значений $Z_{\text{эф}}^{\text{const}}$ до 10%, что сравнимо с экспериментальной ошибкой измерения.

В качестве примера на рис. 4 показано типичное поведение параметра $Z_{\text{эф}}^{\text{const}}(t)$ в процессе разряда, регистрируемое хордовой диагностикой.

Виден характерный для омических разрядов рост во времени значений $Z_{\text{эф}}^{\text{const}}(t)$, свидетельствующий об увеличении загрязнённости плазмы

лёгкими примесями в течение разряда. Увеличение $Z_{\text{эф}}^{\text{const}}$ сопровождается дополнительным усилением обострения профиля $Z_{\text{эф}}(r)$, что подтверждается остальными тремя диагностиками комплекса, измеряющими $Z_{\text{эф}}(r, t)$. Совместное проявление эффектов накопления и обострения профилей концентраций примесей позволяет считать наблюдаемый процесс неклассическим процессом аккумуляции примесей у оси шнура. Как будет продемонстрировано далее, рост значений $Z_{\text{эф}}$ в разряде и связанное с ним усиление обострения профиля $Z_{\text{эф}}(r)$ могут стать причиной самопроизвольного прекращения пилообразных колебаний в разрядах с предельным отношением \bar{n}_e/I_p .

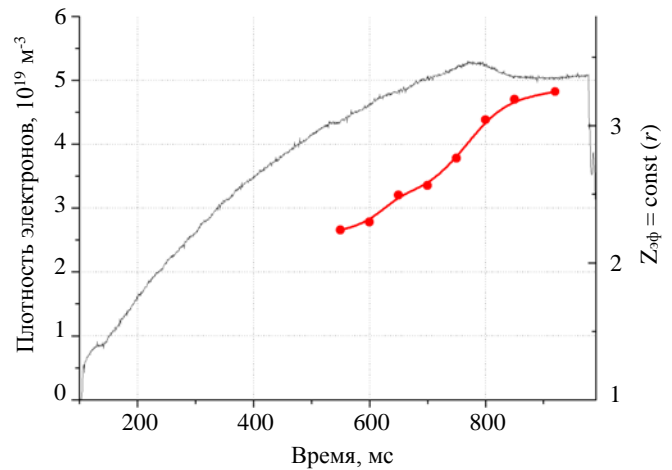


Рис. 4. Динамика величин \bar{n}_e (—) и $Z_{\text{эф}}^{\text{const}}$ (—) в разряде № 66 123 с током 180 кА

МНОГОХОРДОВАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОВ В РАЙОНЕ 5291 Å С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Рассматриваемая система создавалась для регистрации спектров CXRS-диагностики Т-10 [8], кроме того, она была задействована для измерения профилей тормозного континуума. В схеме измерений задействован двухканальный светосильный спектрометр с двумя дифракционными решётками. Для измерений тормозного континуума используется первый канал с дифракционной решёткой 3300 штр./мм на длину волны 5291 Å. В качестве детектора используется EMCCD-камера PhotonMAX512B.

Параметры системы:

- девять хорд наблюдения, прицельные параметры которых распределены равномерно от -10 до 30 см;
- высокое временное разрешение измерений спектров при длительности экспозиции CCD-матрицы 1 мс и интервале между экспозициями $3,3$ мс;
- пространственное разрешение $1-2$ см;
- спектральное разрешение $1,5 \text{ \AA}$ в режиме регистрации CXRS-спектров и $0,15 \text{ \AA}$ при измерениях тормозного континуума;
- наличие абсолютной калибровки всех девяти пространственных каналов.

Важным преимуществом данной системы измерений по сравнению с 13-канальной является высокое временное разрешение, а по сравнению с быстрой однохордовой описанной ранее системой,

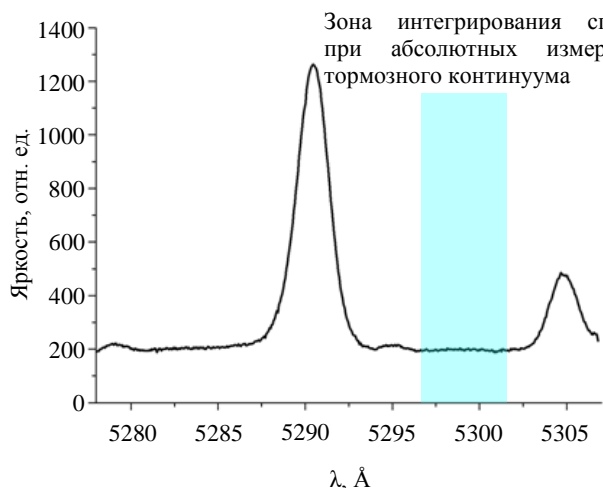


Рис. 5. Спектр излучения плазмы в районе линии 5291 \AA иона C^{5+} , регистрируемый при одновременном измерении контура данной линии и яркости континуума. Спектральное разрешение $1,5 \text{ \AA}$

положенном в районе 5291 \AA , с временным разрешением $\sim 50-100$ мс, а 9-хордовая система измеряла профили интенсивности излучения в «континуумном окне» с временным разрешением 1 мс. Оценки вклада молекулярных линий в спектр излучения данного «окна» показывают, что он лишь несущественно превышает величину, регистрируемую для основного «континуумного окна» 5236 \AA . В результате 9-канальная система, с учётом независимых данных 13-канальной системы о пространственных профилях излучения молекул в сечении «D», получает всё необходимое для проведения абсолютных измерений профилей тормозного континуума с высоким временным разрешением.

Главная особенность 9-канальной системы в том, что одна и та же измерительная аппаратура обеспечивает работу двух независимых диагностик $Z_{\phi}(r)$: из CXRS-измерений и интенсивности тормозного континуума. CXRS-диагностика, будучи самостоятельной диагностикой профилей температуры и концентрации ионов, является одной из наиболее эффективных диагностик профиля $Z_{\phi}(r)$, поскольку напрямую измеряет абсолютные величины локальных содержаний ($n_Z(r)/n_e(r)$) ядер легких примесей в шнуре. Получение в эксперименте указанных данных позволяет сразу определить локальный профиль эффективного заряда в большей части шнура, избегая при построении профиля $Z_{\phi}(r)$ таких некорректных задач, как абелизация излучения континуума.

Поскольку измерения проводятся в одинаковой геометрии и по одним и тем же хордам наблюдения, возможна проверка на непротиворечивость экспериментальных данных о содержании примесей и их пространственных профилях, получаемых с помощью обеих диагностик. При этом в условиях плазмы с плотностью $\bar{n}_e > (1-1,5)10^{19} \text{ м}^{-3}$ наблюдается хорошее совпадение измеряемых значений Z_{ϕ} с расхождениями, не превышающими 15% .

измерение тормозного излучения по девяти пространственным хордам, а не по одной центральной.

Для измерения абсолютной интенсивности тормозного континуума 9-канальная система использует узкое «континуумное окно» в районе линии 5291 \AA иона углерода C^{5+} (используемой в CXRS-измерениях), свободное от линий атомов и ионов основных примесей (рис. 5).

Рассмотренная далее 13-канальная система измерений с высоким спектральным разрешением во многих экспериментах использовалась для регистрации того же участка спектра вблизи линии 5291 \AA , что и 9-хордовая система. В этом случае обе диагностики взаимно дополняли друг друга: 13-хордовая система измеряла профили континуума и вклад молекулярных линий в «окне», рас-

Рис. 6 демонстрирует возможности данной диагностики по исследованию динамических процессов в плазме. На рис. 6, а показана динамика средней плотности плазмы и центральной электронной температуры в разряде с током 180 кА при кратковременном включении в момент времени 810 мс центрального ЭЦР-нагрева мощностью $\sim 0,7$ МВт. На рис. 6, б показана эволюция яркости тормозного континуума по различным хордам наблюдения в омической и ЭЦРН-стадиях разряда.

Диагностика позволяет зарегистрировать, как при включении центрального ЭЦР-нагрева резко падает интенсивность излучения континуума по центральным каналам (от -5 до $+5$ см), что свидетельствует о значительном ухудшении удержания примесей в центре шнура при ЭЦРН, приводящем к эффективному удалению примесей из центральной зоны. Данный эффект подтверждается одновременными CXRS-измерениями и является темой самостоятельного исследования. В течение первых ~ 20 мс после включения ЭЦРН на T-10 практически не изменяется свечение линий примесей и рабочего газа, а также не изменяется плотность плазмы на периферии, что свидетельствует о том, что поступление частиц рабочего газа и примесей в плазму в течение 20 мс после включения ЭЦРН остаётся неизменным. Таким образом, изменения формы профиля $Z_{\text{эф}}(r)$ на начальном этапе работы ЭЦРН определяется исключительно изменением переноса ионов и электронов в условиях ЭЦРН.

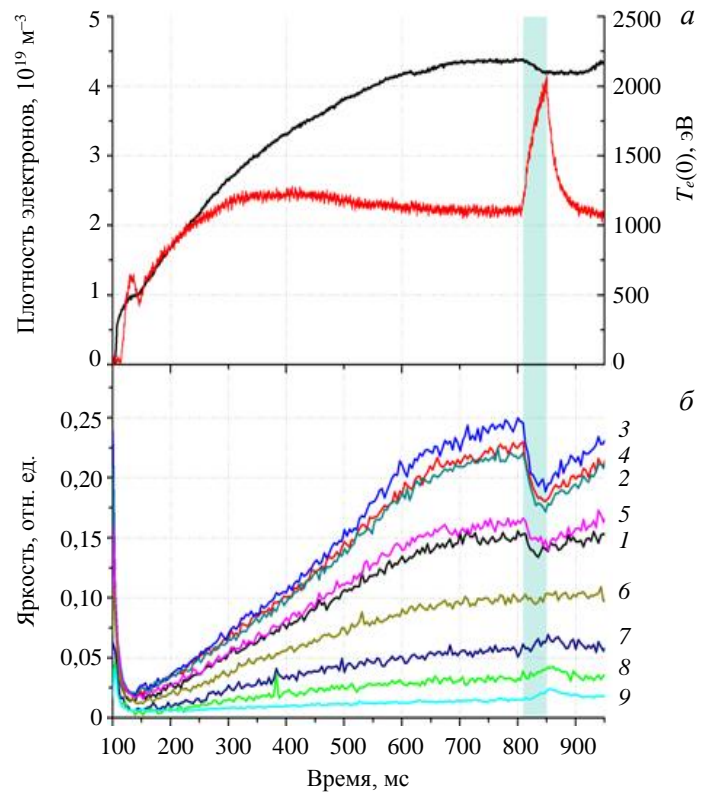


Рис. 6. Эволюция величины \bar{n}_e и центральной электронной температуры в разряде № 65 300 с током 180 кА и ЭЦР-нагревом мощностью 0,7 МВт, включаемым на 810-й мс длительностью 40 мс (участок, выделенный цветом) (а); эволюция интенсивности тормозного континуума на различных хордах наблюдения в сечении «D»: $h = -10$ (1), -5 (2), 0 (3), 5 (4), 10 (5), 14 (6), 19 (7), 24 (8), 28 см (9) (б)

МНОГОХОРДОВАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОВ В РАЙОНЕ 5236 \AA С ВЫСОКИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Многохордовая система решает две основные задачи:

- измерение хордового профиля $J_{\text{бр}}(x)$ тормозного континуума в разряде;
- определение относительного вклада молекулярного излучения в спектр «континуумного окна»

для использования этих данных при определении абсолютных значений и профиля $Z_{\text{эф}}$ с помощью других систем диагностического комплекса, размещённых в сечении «D».

Подробное описание и примеры измерений с помощью 13-хордовой системы измерений с высоким спектральным разрешением приведены в работе [13].

СКАНИРУЮЩАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОФИЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ $5236 \pm 6 \text{ \AA}$

Для обнаружения характерных особенностей формы профиля тормозного континуума дискретные измерения многохордовых систем дополнены пространственно-временной развёрткой излучения, смонтированной в экваториальной трубке сечения «В» (см. рис. 1).

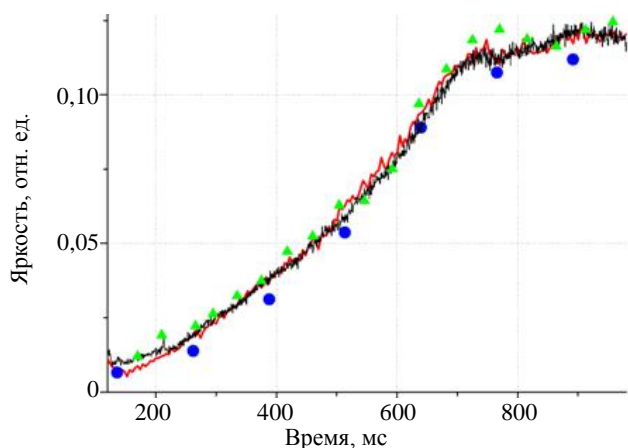
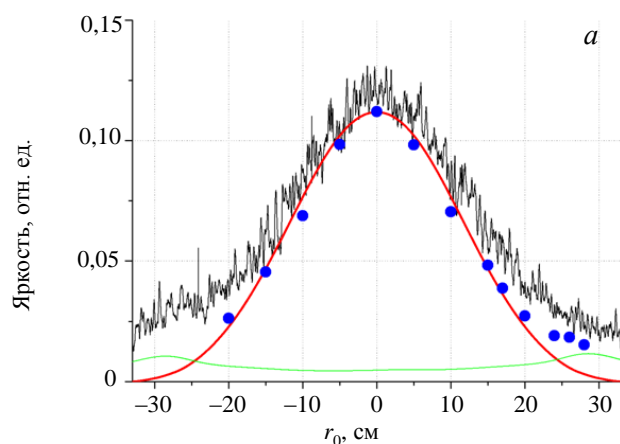


Рис. 7. Измерения динамики тормозного континуума в разряде № 65 169 с помощью различных систем: ● — многохордовая система регистрации спектров в районе 5236 \AA с высоким спектральным разрешением (центральная хорда); ▲ — сканирующая диагностика профиля интегрального излучения в области $5236 \pm 6 \text{ \AA}$ (центральная часть профилей); — — «быстрые» каналы регистрации интегрального излучения в области $5236 \pm 6 \text{ \AA}$ (канал регистрации под углом 30°); — — многохордовая система регистрации спектров в районе 5291 \AA с высоким временным разрешением (центральная хорда)



Подробное описание и примеры измерений тормозного континуума с помощью сканирующей диагностики приведены в работе [14].

На рис. 7 показан пример измерений динамики интенсивности тормозного излучения в разряде Т-10 с помощью всех представленных в работе систем. Рисунок демонстрирует хорошее согласие результатов, получаемых с помощью всех задействованных диагностик, что подтверждает надёжность проводимых измерений.

Пример совместных измерений профиля тормозного континуума с помощью сканирующей диагностики и 13-хордовой диагностики показан на рис. 8, а. Видно, что измеренные разными способами профили тормозного излучения хорошо согласуются друг с другом, обеспечивая надёжные измерения профиля величины эффективного заряда. Полученный профиль $Z_{\text{эф}}(r)$ показан на рис. 8, б. Распределение $Z_{\text{эф}}(r)$

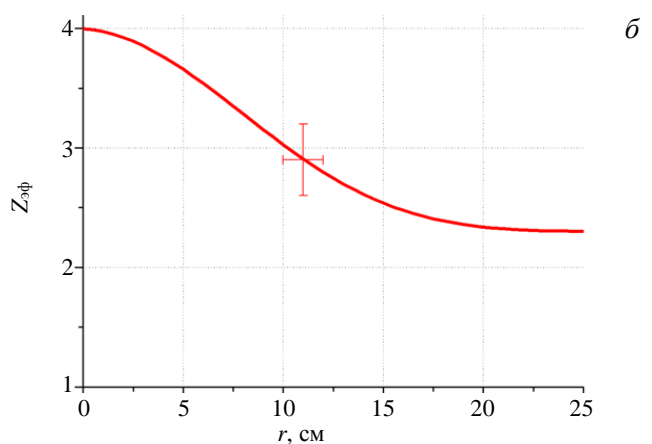


Рис. 8. Измерения профиля тормозного континуума в разряде № 65 169 в интервале 850—950 мс: ● — данные многохордовой системы регистрации спектров в районе 5236 \AA с высоким спектральным разрешением; — — данные сканирующей диагностики профиля интегрального излучения в области $5236 \pm 6 \text{ \AA}$, расположенной в сечении «В»; — — паразитное излучение в сечении «В»; — — расчётный профиль тормозного континуума (а); радиальное распределение величины $Z_{\text{эф}}(r)$ (б)

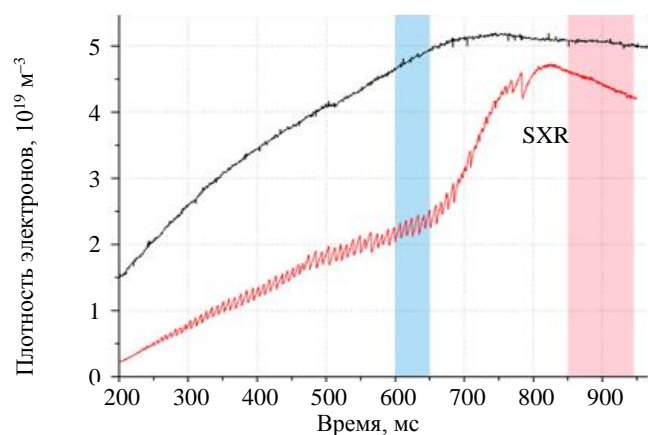


Рис. 9. Эволюция электронной плотности и интенсивности SXR-излучения в омическом разряде № 66 124 с током 180 кА. Закрашенные участки соответствуют времени измерения профилей тормозного излучения, представленных на рис. 10

в данном разряде имеет обострённую форму, что связано с аккумуляцией лёгких примесей у оси шнура при низком токе и высокой плотности плазмы в омической стадии разряда Т-10. Такое поведение примесей можно связать с превышением неоклассического переноса над аномальным в условиях наблюдаемого высокого уровня загрязнённости плазмы Т-10 [15].

В отдельных омических разрядах с высоким отношением \bar{n}_e / I_p и в условиях повышенного содержания примесей наблюдается внезапное прекращение пилообразных колебаний в отсутствие каких-либо дополнительных внешних воздействий на разряд (рис. 9).

На рис. 10 показаны хордовые профили тормозного излучения и соответствующие им радиальные распределения $Z_{эф}$ в разряде с низким током 180 кА и высокой плотностью $\bar{n}_e = 4,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Поведение плотности электронов в данном разряде показано на рис. 9.

Данный тип омических разрядов характеризуется аккумуляцией лёгких примесей, что наглядно демонстрирует распределение $Z_{эф}$ на рис. 10, б. В процессе аккумуляции примесей на участке разряда 700—850 мс распределение $Z_{эф}(r)$ переходит от однородного, измеряемого в разряде в интервале от 550 до 700 мс, до существенно обострённого к 850-й мс. Эти данные хорошо согласуются с результатами CXRS-измерений профилей концентраций ядер С и О [15].

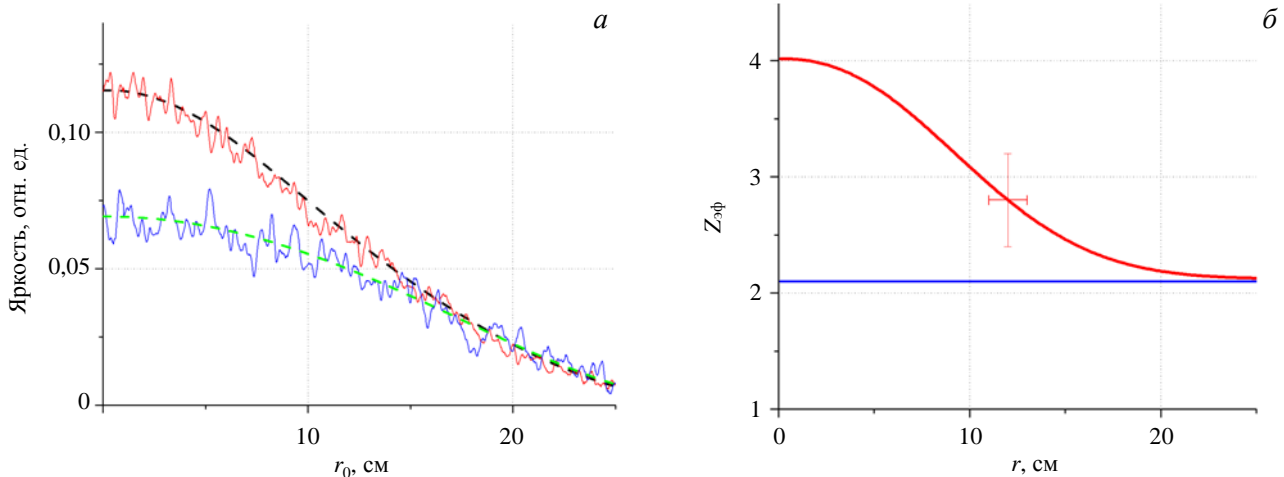


Рис. 10. Хордовые распределения яркости тормозного континуума до и после прекращения пилообразных колебаний в разряде № 66 124 с током $I_p = 180 \text{ кА}$ и $\bar{n}_e = 4,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$: — — — измерения в интервале 600—650 мс; — — — измерения в интервале 850—950 мс; — — — — расчётная яркость при $Z_{эф}(r) = 2,1$; - - - - расчётная яркость при обострённом профиле $Z_{эф}(r)$ (а); распределение эффективного заряда плазмы, использованное в модели для построения расчётных распределений свечения тормозного континуума, показанных на рис. 10, а (б)

ОБСУЖДЕНИЕ ЗАДАЧ И РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Кроме разработки методики надёжного измерения величины и профиля $Z_{эф}(r)$, авторы данной работы заинтересованы в использовании получаемых данных о $Z_{эф}(r)$ для решения физических задач. Так, достоверные данные о $Z_{эф}(r)$, а также о профиле и абсолютной величине ядер лёгких примесей, получаемые с помощью CXRS-диагностики [8] (с одновременным измерением источников ядер примесей), позволяют ставить актуальные задачи, связанные с исследованием переноса ядер лёгких примесей и их влияния на параметры разряда токамака.

Как отмечено в статье, в течение последней экспериментальной кампании созданный комплекс диагностик позволил зафиксировать высокий уровень загрязнённости плазмы Т-10 ($Z_{эф} \sim 3$), существенно влияющей на основные характеристики разряда. Возможные причины значительного поступления лёгких примесей в разряд на установке Т-10 рассмотрены в работе [16]. В свою очередь, высокое содержание лёгких примесей способно явиться причиной возникновения аккумуляции примесей неоклассического типа, наблюдаемой в плазме Т-10. Образующийся при этом сильно обострённый профиль $Z_{эф}(r)$ может вызывать выполаживание профиля тока и обеспечивать тем самым эффективное влияние примесей на параметры разряда. Можно предполагать, что данный процесс является одной из основных причин наблюдаемого на омической стадии разряда прекращения пилообразных колебаний [17].

Одновременное описание в транспортных моделях динамики концентраций ядер примесей и их стационарных профилей, а также динамики и профилей источников ядер, позволяет измерять характерные времена удержания примесей, а также оценивать такие детальные характеристики переноса ионов, как коэффициент диффузии ядер примесей $D_z(r)$ и величину их конвективной скорости $V_z(r)$ [3].

Величина и профиль $Z_{эф}(r)$, компонентный состав примесей и их распределение по зарядовым состояниям влияют на массовую плотность плазмы, которая определяет закономерности возникновения и

характеристики альфвеновских собственных мод плазменных колебаний [18], определяющих удержание быстрых частиц в плазме как современных токамаков, так и будущего реактора.

Указанные физические задачи будут являться предметом дальнейшего исследования на Т-10. При этом важным условием для их выполнения, помимо использования надёжных атомных данных [19] и транспортных кодов [20], является проведение надёжных измерений абсолютных величин, пространственных распределений и динамики концентрации ядер примесей и их источников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан диагностический комплекс, предназначенный для измерений пространственного распределения и абсолютной величины $Z_{\text{эф}}$ в плазме Т-10. Данный комплекс совместно с CXRS-измерениями позволяет исследовать такие важные процессы, как влияние примесей на параметры разряда и перенос ядер лёгких примесей в шнуре.

В состав комплекса входят четыре спектроскопические системы, каждая из которых обладает своими достоинствами в виде высокого пространственного, временного или спектрального разрешения. Предельное временное разрешение измерений может достигать 10 мкс, пространственное — 1 см, спектральное — 0,15 Å. Каждый отдельный элемент комплекса обеспечивает, в первую очередь, решение своей диагностической задачи, но при этом они взаимно дополняют друг друга. Кроме того, применение нескольких независимых систем позволяет повысить надёжность экспериментальных данных.

Использование двух «быстрых» хорд позволяет оперативно оценивать в данном эксперименте уровень загрязнённости плазмы лёгкими примесями. Остальные элементы комплекса диагностик направлены на измерение радиального распределения величины $Z_{\text{эф}}$.

На Т-10 в процессе измерений $Z_{\text{эф}}$ определяется вклад молекулярного спектра в измеряемую интенсивность излучения в «континуумном окне». Учёт вклада от молекулярного линейчатого излучения может дать существенную поправку в измеряемую величину $Z_{\text{эф}}$, особенно на периферии плазменного шнура.

В дополнение к измерениям континуума по фиксированным хордам наблюдения в экспериментах используется система непрерывного измерения профилей излучения континуума и водородоподобных ионов примесей с высоким пространственным разрешением.

Комплекс диагностик $Z_{\text{эф}}$ задействован на Т-10 вместе с CXRS-диагностикой, при этом расхождение величин и профилей $Z_{\text{эф}}(r)$, измеряемых двумя методами, не превосходит 15% в области шнура $\rho \leq 0,7$ ($\rho = r/a_L$).

Различные типы плазменных колебаний, в частности, геодезические акустические моды (ГАМ) могут в значительной степени определять физику транспортных процессов в плазме токамака [21, 22]. В экспериментальных и теоретических работах показана существенная зависимость свойств колебаний данного типа от состава плазмы и уровня загрязнённости различными примесями [23, 24]. В ходе экспериментов в 2014 г. проведено изучение поведения ГАМ в условиях плазмы с высокой величиной $Z_{\text{эф}} \sim 3-4$ [25]. В будущих экспериментальных кампаниях Т-10 ввиду значительных конструкторских изменений в вакуумной камере ожидается уменьшение величины $Z_{\text{эф}}$, что обеспечит необходимые экспериментальные данные о поведении плазменных колебаний в условиях чистой плазмы и позволит провести экспериментальное исследование влияния уровня и радиального распределения $Z_{\text{эф}}$ на поведение таких плазменных колебаний на Т-10. Дополнительный интерес для изучения плазменных колебаний представляет определение массовой плотности плазмы в области возникновения ГАМ в разрядах с дополнительным нагревом, где наблюдается радикальное изменение величины и профиля $Z_{\text{эф}}(r)$, а также распределения примесей по зарядовым состояниям [15].

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

Приложение

Одним из важнейших преимуществ метода определения $Z_{\text{эф}}$ из интенсивности тормозного континуума в видимой области является наличие хорошо известного скоростного коэффициента возбуждения

данного излучения. Основным источником его неопределённости связан с величинами гаунт-факторов свободно-свободных переходов для ионов рабочего газа и ядер лёгких примесей.

Существует несколько аналитических выражений и численных расчётов для гаунт-факторов g_{ff} , используемых разными авторами, сравнение которых приведено в работе [26]. Различие величин гаунт-факторов для ядер примесей $Z = 3—6$ при $T_e > 1$ кэВ по данным всех авторов не превышает 10% (рис. 11). При определении величины $Z_{эф}$ на Т-10 использовались данные численного расчёта Карзаса и Лэттера [27].

Различие гаунт-факторов для ядер С и О много меньше величин самих гаунт-факторов, что позволяет измерять $Z_{эф}$, не выясняя соотношение концентраций ядер С и О. В то же время проводимые на Т-10 CXRS-измерения обеспечивают данные о соотношениях концентраций ядер различных примесей.

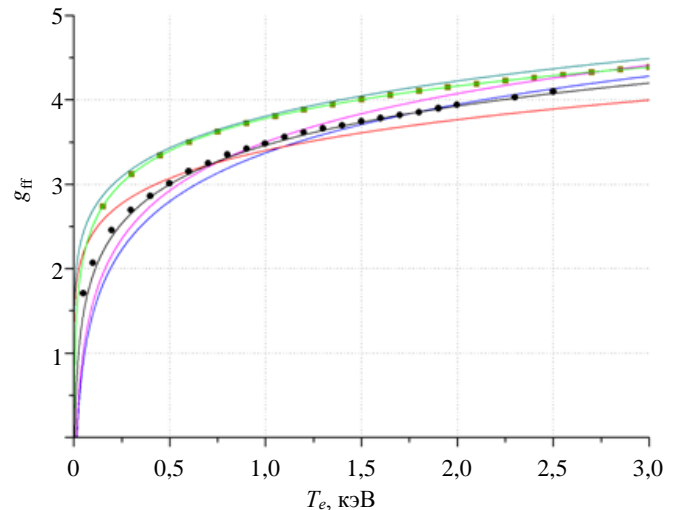


Рис. 11. Зависимость величины гаунт-фактора свободно-свободных переходов от температуры электронов, аналитические выражения: — Грима [28]; ■ — Элверга [29]; — Крамера [29]; — Рэмзи [30]; — полуэмпирическое выражение, используемое на DIII-D [31]; — Morita et al [32]; — Carson [33]; • — численный расчёт Карзаса и Лэттера [27]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ITER Physics Basis. — Nuclear Fusion, 1999, vol. 39, № 12, p. 2561.
2. Sharapov V.M. et al. — J. Nucl. Mater., 1995, vol. 220—222, p. 730—735.
3. Krupin V. et al. — In: 12th European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics. Budapest, 2—6 September 1985, ECA, vol. 9F, p. 207—210.
4. Meister et al. — Review of Scientific Instruments, 2004, vol. 75, p. 4097—4099.
5. Rathgeber S.K. et al. — Plasma Physics and Controlled Fusion, 2010, vol. 52, p. 95008—95023.
6. Patel A. et al. — Rev. Sci. Instrum., 2004, vol. 75, p. 4944—4950.
7. Chen Y. et al. — Fusion Engineering and Design, 2013, vol. 88, p. 2825—2829.
8. Крупин В.А. и др. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, вып. 4, с. 60—70.
9. Woods L.C. — Review of Scientific Instruments, 1991, vol. 62, p. 1531.
10. Кузнецов Э.И., Щеглов Д.А. Методы диагностики высокотемпературной плазмы. Глава 1. — М.: Атомиздат, 1974.
11. Kadota K., Otsuka M., Fujita J. — Nucl. Fusion, 1980, vol. 20, p. 209.
12. Lipschultz B. et al. — Nucl. Fusion, 1984, vol. 24, p. 977.
13. Ключников Л.А. и др. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, вып. 4, с. 34.
14. Немец А.Р. и др. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, вып. 4, с. 96.
15. Klyuchnikov L.A. et al. — In: Proc. of 25th IAEA Fusion Energy Conf. Saintpetersburg, Russia, October 13—18, 2014, EX/P1-44.
16. Горбунов А.В. и др. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 2, с. 62—67.
17. Klyuchnikov L. et al. — In: 42nd EPS Conf. on Plasma Physics. Lisbon, Portugal, 22—26 June 2015, ECA, vol. 39E, P5. 161.
18. Melnikov A.V. et al. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2015, vol. 57, p. 065006.
19. The Atomic Data and Analysis Structure (ADAS): <http://www.adas.ac.uk/>.
20. Dux R. STRAHL User Manual Laborbericht 10/30, IPP, Garching, September 2006.
21. Melnikov A.V. et al. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2006, vol. 48, p. S87.
22. Gurchenko A.D. et al. — EPL (Europhysics Letters), 2015, vol. 110, № 5, p. 55001.
23. Gusakov E.Z. et al. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2013, vol. 55, p. 124034.
24. Shangchuan Yang et al. — Physics of Plasmas, 2015, vol. 22, p. 044502.
25. Melnikov A.V. et al. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, p. 063001.
26. Verdoolaage G. Bayesian Integrated Determination of the Ion Effective Charge via Bremsstrahlung and Charge Exchange Spectroscopy in Tokamak Plasmas. Doctoral dissertation, Ghent University, 2006—2007, p. 45—47.
27. Karzas W., Latter R. — Astroph. J. Suppl., 1961, vol. 6, p. 167.
28. Griem H. Plasma Spectroscopy. Chapter 5. — New York: McGraw-Hill, Inc., 1964.
29. Brussaard P., van de Hulst. — Rev. Mod. Phys., 1962, vol. 34, p. 507.
30. Ramsey A. — Rev. Sci. Instrum., 1987, vol. 58, p. 1211.
31. Delabie E. — Integrated Study of Impurity Profiles in the Plasma of the Tokamaks TEXTOR and Tore Supra. Doctoral dissertation, Ghent University, 2005—2006, p. 38—39.

32. **Morita S. et al.** Technical Report ORNL/TM-11737, Oak Ridge National Laboratory, 1991.

33. **Carson T.R.** — Astron. Astrophys., 1988, vol. 189, p. 319—324.



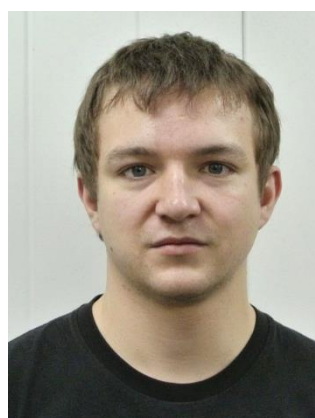
Вадим Александрович Крупин, в.н.с, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



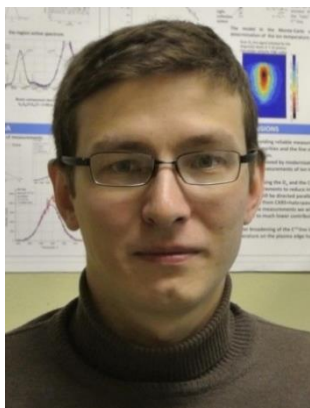
Антон Ролланович Немец, м.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Nemets_AR@nrcki.ru



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



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



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



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

Статья поступила в редакцию 15 августа 2015 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 1, с. 81—94.