УДК 533.9.082

МНОГОХОРДОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ЗАРЯДА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ Т-10 ПО ИНТЕНСИВНОСТИ ТОРМОЗНОГО КОНТИНУУМА В ВИДИМОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ВЫСОКОМ СПЕКТРАЛЬНОМ РАЗРЕШЕНИИ

Л.А. Ключников¹, А.Р. Немец¹, В.А. Крупин¹, К.В. Коробов¹, М.Р. Нургалиев¹, Н.Н. Науменко²,
С.Н. Тугаринов³, Д.С. Деньчиков¹

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

²Институт физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

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

Профиль величины эффективного заряда плазмы $Z_{\text{эф}}(r)$ влияет на эффективность нагрева, удержания тепла и частиц и устойчивости плазмы. Данная статья посвящена описанию одной из систем измерений величины эффективного заряда $Z_{\text{эф}}$ в плазме токамака Т-10. Базовым элементом системы является спектрометр высокого спектрального разрешения, предназначенный для измерений профиля интенсивности тормозного континуума в видимой области спектра одновременно по 13 хордам наблюдения. Основная функция данной системы состоит в выделении излучения тормозного континуума на фоне паразитных линий молекулярного спектра, что требуется для определения радиального профиля $Z_{\text{эф}}$. Определение соотношения интенсивностей молекулярных линий и тормозного континуума необходимо также для обеспечения измерений $Z_{\text{эф}}$ с помощью других диагностик, размещённых на токамаке, но не имеющих достаточного спектрального разрешения. В статье приводятся результаты измерений профилей тормозного континуума в разрядах Т-10 с различными параметрами. Созданная система обеспечивает получение необходимых данных для исследования переноса примесей и физики геодезических акустических мод плазменных колебаний в токамаке Т-10.

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

MULTICHANNEL MEASUREMENTS OF EFFECTIVE PLASMA CHARGE IN T-10 TOKAMAK USING VISIBLE BREMSSTRAHLUNG INTENSITY UNDER HIGH SPECTRAL RESOLUTION

L.A. Klyuchnikov¹, A.R. Nemets¹, V.A. Krupin¹, K.V. Korobov¹, M.R. Nurgaliev¹, N.N. Naumenko²,
S.N. Tugarinov³, D.S. Denschikov¹

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 plasma charge profile $Z_{\text{eff}}(r)$ affects the efficiency of the heating, energy and particle confinement and plasma stability. The article describes a diagnostic systems for measurements of Z_{eff} value on T-10 tokamak. Basic element of the system is high resolution spectrometer HES used for measurements of radial distribution of visible bremsstrahlung by 13 lines of sight simultaneously. The main function of the system is measurement of bremsstrahlung on the background of parasitic spectral lines of deuterium molecules also for determination of radial distribution of Z_{eff} . Ratio between bremsstrahlung and molecular emission is necessary also for providing of Z_{eff} measurements using other diagnostic systems of T-10 that have lower spectral resolution. Results of bremsstrahlung measurements in different discharges of T-10 are shown. Developed diagnostics provides experimental data for investigation of transport processes and physics of geodesic acoustic modes of plasma oscillations at T-10.

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

ВВЕДЕНИЕ

Величина эффективного заряда плазмы $Z_{\text{эф}}$ характеризует загрязнённость плазмы ионами примесей с зарядами Z_i и определяется следующим выражением:

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

Для определения уровня $Z_{\text{эф}}$ на установке Т-10 [1], а также на многих других плазменных установках [2—5] используются измерения интенсивности тормозного излучения непрерывного спектра (тормозного континуума) в видимой области спектра. В отличие от большинства других схем измерений $Z_{\text{эф}}$, развитых на других установках, на Т-10 в схеме комплекса диагностик задействован спектрометр с высо-

ким спектральным разрешением, позволяющий значительно поднять точность определения абсолютной величины и радиального распределения эффективного заряда плазмы. Интенсивность тормозного излучения $I_{\text{bremstrahlung}}$ определяется следующим выражением:

$$I_{\text{bremstrahlung}} \sim \frac{\sum_i n_e n_i Z_i^2 g_{\text{ff}}(Z_i, T_e)}{\sqrt{T_e}}, \quad (2)$$

где n_e — плотность электронов; n_i — плотность ионов с зарядом Z_i ; T_e — электронная температура; g_{ff} — гаунт-фактор свободно-свободных переходов.

Из выражения (2) при условии известного состава примесей плазмы с помощью преобразований может быть установлена прямая связь между величиной $Z_{\text{эф}}$ и интенсивностью тормозного континуума.

Измерения тормозного континуума ведутся в так называемых «континуумных окнах» — участках спектра, свободных от линий атомов и ионов примесей и рабочего газа плазмы. Тем не менее в «континуумных окнах» присутствует молекулярное линейчатое излучение рабочего газа H_2 или D_2 . Для надёжного измерения уровня тормозного излучения в условиях присутствия паразитного молекулярного требуется развить спектральную диагностику с высоким спектральным разрешением $\sim 0,1\text{--}0,2 \text{ \AA}$.

Представленная в данной статье система создана для решения следующих задач:

— измерение хордового профиля яркости $J_{\text{br}}(x)$ тормозного континуума в «континуумном окне» с вычетом молекулярного излучения, представляющего собой линейчатый спектр с промежутками между линиями порядка $1\text{--}2 \text{ \AA}$, которые образуют так называемый молекулярный квазиконтинуум;

— определение относительного вклада молекулярного квазиконтинуума в спектр «континуумного окна» для использования этих данных при определении абсолютных значений и профиля $Z_{\text{эф}}$ с помощью других измерительных систем, размещённых в том же диагностическом сечении Т-10.

СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ (рис. 1)

Базовым элементом системы является спектрометр HES (High Etendue Spectrometer) с апертурным углом $1/3,2$, работающий на отражательной решётке Эшелле 200 штр./мм в 14-м порядке дифракции. Предельное спектральное разрешение спектрометра в районе «континуумного окна» $5236 \pm 6 \text{ \AA}$ составляет $0,19 \text{ \AA}$ при дисперсии $4 \text{ \AA/мм}$. Измерения показывают, что спектрометр HES с дополнительным интерференционным фильтром с полушириной $100 \text{ \AA}$ обладает малым уровнем рассеянного света, достаточным для надёжного измерения интенсивности тормозного континуума.

Для передачи света с установки в спектроскопическую пульттовую используется многоканальный кварц-полимерный световод, излучение с выходного торца которого передаётся на входную щель спектрометра через переходной объектив. Коллектор длиной 40 м собран из волокон диаметром 100 мкм и имеет выходной торец шириной 1,5 и высотой 20 мм. По высоте коллектор равномерно разделён на 14 каналов, из которых 13 используются для измерений профиля тормозного континуума.

Все 13 хорд наблюдения расположены в полой плоскости Т-10 в одном диагностическом сечении. В данном сечении Т-10 отсутствуют диафрагмы, ограничивающие сечение плазменного шнура, и нет источников дополнительного нагрева и напуска газов, что позволяет свести к минимуму уровень линейчатого молекулярного излучения в зоне регистрации тормозного излучения плазмы.

Пространственное разрешение многохордовых измерений составляет $1\text{--}2 \text{ см}$. Временное разрешение определяется временем набора полезного сигнала и составляет от 30 до 100 мс при длительности разряда Т-10 до 1 с и стационарной стадии разряда до 500 мс.

Рис. 1. Схема измерений профиля величины $Z_{\text{эф}}$ на Т-10

Для относительной калибровки чувствительности пространственных каналов измерений используется излучение, возбуждаемое в газе пучком быстрых атомов диагностического инжектора ДИНА-6, находящегося в том же сечении токамака и задействованного в схеме CXRS-диагностики Т-10 [6]. В CXRS-измерениях такой метод широко применяется и является стандартным способом калибровки. Методика относительной калибровки состоит в следующем. В вакуумный объём токамака при выключенных магнитных полях напускается газ H_2 под давлением $\sim 10^{-2}$ Па. В процессе импульса инжектора в объём токамака инжектируются атомы и ионы как основного энергетического компонента E_0 , так и малых дополнительных компонентов с энергией $E_0/2$, $E_0/3$ и $E_0/18$. При этом в каждом из 13 измерительных каналов системы регистрируется свой

Рис. 2. Спектр излучения линий H_α газа и пучка при импульсе инжектора

спектр линий H_α атомов газа и пучка (рис. 2), излучаемый из зон пересечения пучка с 13 хордами наблюдения.

Регистрируемое линейчатое излучение газа и пучка возникает под влиянием всех атомных процессов, действующих при прохождении пучка через газ: ионизации, диссоциации, перезарядки и возбуждения. При этом процессы ионизации и перезарядки атомов пучка при указанном давлении газа полностью уравнивают друг друга и поддерживают на фиксированном уровне концентрацию атомов и ионов пучка вдоль всей его траектории. Таким образом, интенсивности линий H_α пучка, как и линии H_α газа, не должны изменяться вдоль траектории пучка при условии однородного давления газа H_2 в объёме. Из эксперимента сле-

дует, что соотношение интенсивностей линий H_α пучка и газа на всех пространственных каналах остаётся одинаковым, что даёт возможность провести относительную калибровку каналов. Необходимо также учитывать расходимость пучка при прохождении через объём токамака, что в условиях Т-10 даёт поправку не более 10%. Кроме того, при калибровке учитывается, что хорды пересекают пучок под различными углами.

СТРУКТУРА СПЕКТРА «КОНТИНУУМНОГО ОКНА» $5236 \pm 6 \text{ Å}$

На рис. 3 показан характерный спектр, измеряемый в эксперименте с помощью спектрометра HES с разрешением $\sim 0,2 \text{ Å}$ в районе «континуумного окна» 5236 Å . Данный спектр соответствует

Рис. 3. Пример спектра в районе «континуумного окна» $5236 \pm 6 \text{ Å}$, измеренного по центральной хорде

центральной хорде наблюдения и получен в омическом разряде с разрядным током 220 кА и средней плотностью $\bar{n}_e \sim 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ($\bar{n}_e$ — средняя плотность, измеренная вдоль центральной хорды). Плотный молекулярный линейчатый спектр, наблюдаемый в «континуумном окне» на фоне значительной подложки излучения континуума, принадлежит преимущественно молекулам дейтерия [7].

Как видно на рис. 3, интегральная интенсивность молекулярных линий по центральной хорде составляет $\sim 10\%$ от уровня тормозного континуума. На периферийных хордах интенсивность тормозного континуума существенно снижается (в соответствии с зависимостью $I_{\text{bremsstrahlung}} \propto n_e^2$),

вклад молекулярного свечения нарастает, доводя вклад от молекулярных линий на радиусе $\rho = 0,85$ до $\sim 30\text{--}40\%$.

При включении ЭЦР-нагрева интенсивность излучения тормозного континуума в центральной области плазмы, как правило, уменьшается, а интенсивность регистрируемых молекулярных линий возрастает в 2—3 раза относительно значений в омической плазме, что существенно усложняет измерения $Z_{\text{эф}}$, проводимые по интегральному излучению в «континуумном окне». При этом рассматриваемая многохордовая диагностика континуума оказывается исключительно востребованной для установления вклада молекулярных линий в суммарную интенсивность «континуумного окна».

ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ КОНТИНУУМА 13-ХОРДОВОЙ СИСТЕМОЙ

На рис. 4 показан хордовый профиль яркости тормозного излучения $J_{\text{бр}}(x)$, измеренный в омическом разряде с током $I_p = 250$ кА и средней плотностью $\bar{n}_e = 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, а также тормозное излучение с дополнительным вкладом от молекулярного излучения.

Сплошная линия на рисунке соответствует рассчитанному хордовому профилю яркости $J_{\text{бр}}(x)$ с учётом измеренных профилей $n_e(r)$ и $T_e(r)$ и в предположении однородного профиля $Z_{\text{эф}}(r) = \text{const}$. Такое распределение $Z_{\text{эф}}(r)$ является типичным для большинства разрядов Т-10. Видно, что при однородном распределении эффективного заряда экспериментальные данные хорошо совпадают с модельным профилем в большей части шнура.

Особо отметим тот факт, что на периферии плазмы наблюдается характерное превышение экспериментальных точек над модельной кривой (см. рис. 4). Это можно объяснить тем, что в спектрах «континуумных окон» имеются линии, которые не могут быть разрешены при спектральном разрешении $\sim 0,2 \text{ \AA}$. Не исключено также, что наблюдаемая дополнительная подложка образована излучением рекомбинационного континуума из холодных пристеночных областей плазмы. В работе [8] показано, что паразитное излучение на периферии возникает при диссоциации молекул дейтерия. Подобная подложка регистрировалась на пространственных профилях всех «континуумных окон», в которых проводились измерения тормозного континуума на Т-10.

В экспериментах по определению формы профиля $Z_{\text{эф}}(r)$ рассматриваемая 13-канальная система показала весьма интересные результаты. На рис. 5 показана временная эволюция значений средней плотности плазмы и центральной электронной температуры в режиме с высокой плотностью $\bar{n}_e = 4,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и малым током $I_p = 180$ кА, там же отмечены два последовательных временных интервала, в которых проводились измерения профиля тормозного континуума. Измеренные в эксперименте профили элек-

Рис. 4. Хордовый профиль тормозного континуума в омическом разряде № 65 169 с током 250 кА и средней плотностью $\bar{n}_e = 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$: ■ — вместе с вкладом от молекулярного излучения; ■ — с вычитанием молекулярного излучения; — — расчёт в предположении однородного распределения $Z_{\text{эф}}(r) = \text{const}$

Рис. 5. Временной ход средней хордовой плотности (1) и центральной электронной температуры (2) в разряде № 65 169 с током 180 кА

тронной плотности для участков 1 и 2 идентичны в пределах ошибок. При слабой зависимости интенсивности тормозного континуума от величины электронной температуры ($\sim T_e^{-0,25}$ с учётом температурной зависимости гаунт-фактора) и малых различиях в величинах и профилях T_e в указанных временных интервалах можно считать, что относительная интенсивность излучения тормозного континуума на участках 1 и 2 зависит только от величины $Z_{эф}$.

Сравнение профилей интенсивности тормозного континуума в зонах 1 и 2, показанное на рис. 6, демонстрирует происходящее нарастание центральной величины интенсивности на стационарной стадии разряда при практически полном сохранении интенсивности излучения за пределами $\rho > 0,35$, что свидетельствует об увеличении $Z_{эф}$ в центральной части плазмы вследствие пикирования примесей в центре шнура.

Рис. 6. Профили тормозного континуума в омическом разряде № 65 169 с током 180 кА и средней хордовой плотностью $\bar{n}_e = 4,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$: а — 625—725 мс (1), 750—850 мс (2), смоделированный профиль тормозного континуума в предположении радиального распределения $Z_{эф}(r) = \text{const}$ (—); б — радиальные распределения $Z_{эф}$ в соответствующих временных интервалах

Сплошной красной линией (1) на рис. 6, а показан расчёт хордового профиля тормозного континуума с использованием экспериментальных профилей $n_e(r)$ и $T_e(r)$ при $Z_{эф}(r) = \text{const}$. Видно, что во всём сечении шнура в первом временном окне, а также в зоне $\rho > 0,3$ для второго временного окна эксперимент достаточно хорошо описывается расчётным профилем континуума. При этом для описания профиля континуума во втором временном окне требуется предполагать заметное обострение профиля $Z_{эф}(r)$ в зоне $\rho < 0,4$, показанное на рис. 6, б.

Возникновение пикирования профиля плотности ионов примесей на стационарной стадии разрядов Т-10 с высоким уровнем $Z_{эф}$ подтверждается независимыми CXRS-измерениями профилей концентрации ядер примесей, проводимыми в тех же экспериментах. В работе [9] показано, что пикирование профиля плотности ионов примесей в разрядах Т-10 растёт с увеличением значений $Z_{эф}$ и плотности плазмы, а также с уменьшением величины тока.

СООТНОШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЙ КОНТИНУУМА И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЛИНИЙ В «КОНТИНУУМНЫХ ОКНАХ»

Помимо надёжных измерений профиля интенсивности тормозного континуума, второй важной задачей создания многохордовой системы с высоким спектральным разрешением являлось установление соотношения яркости континуума и молекулярных линий в «континуумных окнах». Эти данные необходимы для других диагностик тормозного излучения. В частности, оценка вклада молекул необходима для «быстрого» измерительного канала, созданного на базе монохроматора и ФЭУ, смонтированного в той же системе сбора света, что и 13-канальная система. При совместной работе этих систем многохордовые измерения континуума получают абсолютную калибровку из интенсивности сигнала, измеряемого по центральному быстрому каналу, а быстрый измерительный канал — оценку доли тормозного континуума в регистрируемом сигнале.

На рис. 7 показан вклад от молекулярных линий в суммарную интенсивность, измеряемую в «континуумном окне» $5236 \pm 6 \text{ \AA}$ при проведении измерений по центральной хорде 4° в зависимости от средней плотности плазмы. С ростом плотности относительный вклад от молекулярного излучения уменьшается, что связано с опережающим ростом интенсивности континуума (как n_e^2) в сравнении с интенсивностью молекулярных линий.

Конкретный вид подобной зависимости индивидуален для каждого сечения токамака и может отличаться даже для измерений по центральным хордам, проводимым в пределах одного сечения, но под разными углами к экваториальной плоскости.

Рис. 7. Вклад молекулярного спектра в полную величину интенсивности «континуумного окна» $5236 \pm 6 \text{ \AA}$, измеряемую по центральной хорде как функция средней плотности плазмы при токе 250 кА (●), при токе 180 кА (●)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На Т-10 реализованы измерения радиального распределения величины $Z_{\text{эф}}(r)$ из интенсивности тормозного континуума на базе спектрометра с высоким спектральным разрешением. Схема измерений обеспечивает вычитание линейчатого молекулярного спектра, что существенно увеличивает точность определения профиля величины $Z_{\text{эф}}$. Характерный вклад молекулярного излучения составляет 7—10% от сигнала, измеряемого по центральной хорде наблюдения в условиях омического разряда с высокой плотностью плазмы ($\bar{n}_e > 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$). Приведены результаты измерений профилей тормозного континуума для случаев как однородного, так и пикированного распределения $Z_{\text{эф}}$. Результаты измерений хорошо согласуются с независимыми данными CXRS-диагностики [9] и могут свидетельствовать о влиянии неоклассических эффектов на перенос примесей, проявляющихся в омических разрядах Т-10 с высоким уровнем $Z_{\text{эф}}$ при высокой плотности и низком токе плазмы.

Радиальный профиль концентрации ионов примесей, а также их компонентный состав и распределение по зарядовым состояниям оказывают влияние на различные плазменные процессы, в том числе на закономерности возникновения и развития геодезических акустических мод колебаний в плазме токамака [10—11]. В частности, на Т-10 было обнаружено существенное изменение амплитуды и частоты ГАМ при импульсном напуске примесей [12]. Учёт влияния примесей на поведение плазмы особенно актуален в условиях токамака Т-10 с углеродным лимитером, где характерные значения эффективного ионного заряда могут достигать $Z_{\text{эф}} \approx 3—3,5$.

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

REFERENCES

1. **Nemets A.R. et al.** — In coll.: XLII International (Zvenigorod) conference on plasma physics and CTF, Zvenigorod, Russia, 9—13 February 2015 (in Russian).
2. **Meister H. et al.** — Review of Scientific Instruments, 2004, vol. 75, pp. 4097—4099.
3. **Rathgeber S.K. et al.** — Plasma Phys. and Control. Fusion, 2010, vol. 52, pp. 95 008—95 023.
4. **Patel A. et al.** — Rev. Sci. Instrum., 2004, vol. 75, pp. 4944—4950.
5. **Chen Y. et al.** — Fusion Engineering and Design, 2013, vol. 88, pp. 2825—2829.
6. **Krupin V.A. et al.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2014, vol. 37, issue 4, pp. 60—70 (in Russian).
7. **Zimin A.M. et al.** — Yadernaya fizika i inzhiniring (Nuclear Physics and Engineering), 2014, vol. 5, № 7—8, pp. 557—563 (in Russian).

8. **Marmar E.S. et al.** — Rev. Sci. Instrum., 2001, vol. 72, p. 940.
9. **Klyuchnikov L. et al.** — In: Proc. of 25th IAEA Fusion Energy Conf. Saint Petersburg, Russia, October, 13—18, 2014, EX/P1-4.4.
10. **Melnikov A.V. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2006, vol. 48, p. S87.
11. **Gusakov E.Z. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2013, vol. 55, p. 124034.
12. **Zenin V.N. et al.** — In: Proc. of 8th Plasma Physics and Plasma Technology Conf. Minsk, Belarus, September 14—18, 2015.

AUTHORS

Klyuchnikov L.A. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
lklyuchnikov@list.ru

Nemets A.R. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Nemets_AR@nrcki.ru

Krupin V.A. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Korobov K.V. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Nurgaliev M.R. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Naumenko N.N. Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, prosp. Nezavisimosti 68,
Minsk, Belarus

Tugarinov S.N. Institution «Project Center ITER», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Denschikov D.S. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Received 10 August 2015
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2015, vol. 38, issue 4, pp. 34—40.