

УДК 533.9.082

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗ ИЗМЕРЕНИЙ ДОПЛЕРОВСКОГО УШИРЕНИЯ ЛИНИИ 5291 Å ИОНА C⁵⁺

*В.А. Крупин¹, Л.А. Ключников¹, М.Р. Нурғалиев¹, А.Р. Немец¹, К.В. Коробов¹,
И.А. Земцов¹, Н.Н. Науменко², С.Н. Тугаринов³*

¹НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Институт физики НАН РБ, Минск, Республика Беларусь

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

Данные о пространственных распределениях ионной температуры востребованы во многих исследовательских программах, проводимых на установках с магнитным удержанием плазмы. На токамаке Т-10 развита спектроскопическая диагностика периферийных значений ионной температуры плазмы из измерений доплеровского уширения пассивной спектральной линии 5291 Å иона углерода C⁵⁺. Цель создания данной диагностики — дополнить результаты активных CXRS-измерений профилей $T_i(r)$ пассивными измерениями в области периферийной плазмы. В предлагаемом способе учитывается, что спектр линии, измеряемый вдоль хорды наблюдения, состоит из суммы локальных спектров линии, излучаемых из определённых радиальных областей шнура с соответствующими ионными температурами. Набор таких спектров, регистрируемых на Т-10 вдоль 13 хорд наблюдения, содержит достаточную информацию для восстановления профиля $T_i(r)$ на периферийном участке плазмы. В схеме измерений задействован светосильный спектрометр высокого спектрального разрешения HES-370 и CCD-камера PIXIS 512B. Для точного выделения величины доплеровского уширения в процессе обработки учитываются физические и аппаратные эффекты, влияющие на форму спектрального контура линии. Получаемые профили $T_i(r)$ на периферии шнура хорошо согласуются с профилями ионной температуры, измеряемыми CXRS-диагностикой. Совместная работа двух диагностик обеспечивает надёжные измерения профиля $T_i(r)$ от центра шнура до зоны SOL. Приведены примеры полученных профилей ионной температуры и отмечен ряд закономерностей поведения периферийной температуры при изменении параметров плазмы. Созданная диагностика обеспечивает необходимые данные для проводящегося на Т-10 исследования геодезических акустических мод (ГАМ), поведение которых сильно зависит от ионной температуры плазмы.

Ключевые слова: токамак Т-10, спектроскопия, доплеровское уширение, ионная температура, CXRS, ГАМ.

DETERMINATION OF EDGE ION TEMPERATURE PROFILE USING MEASUREMENTS OF DOPPLER BROADENING OF C⁵⁺ SPECTRAL LINE 5291 Å

*V.A. Krupin¹, L.A. Klyuchnikov¹, M.R. Nurgaliev¹, A.R. Nemets¹, K.V. Korobov¹, I.A. Zemtsov¹,
N.N. Naumenko², S.N. Tugarinov³*

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²Institute of Physics NASB, Minsk, Republic of Belarus

³Institution «Project Center ITER», Moscow, Russia

Ion temperature radial distribution is demanded in many research programs carried out on facilities with magnetic plasma confinement. Spectroscopic diagnostics of the edge ion temperature via Doppler broadening of the passive spectral line 5291 Å of C⁵⁺ is developed on the T-10 tokamak. The diagnostics is aimed to complement results of the $T_i(r)$ profiles obtained by active CXRS measurements at the plasma edge. It is considered in the proposed method that line integrated spectrum consist of local lines emission from different radial areas with corresponding ion temperatures. A set of these spectra registered via 13 lines of sight provides sufficient information to restore $T_i(r)$ profile. High etendue spectrometer HES-370 and CCD camera PIXIS 512B are used in measurements. Physical and instrumental effects, which deform spectral contour, are taken into account in data treatment to precise determination of the Doppler broadening. Obtained $T_i(r)$ profiles at plasma edge are in good agreement with ion temperature profiles measured by CXRS diagnostics. Joint work of two diagnostics provides reliable measurements of $T_i(r)$ from central area to SOL. Examples of measured profiles, as well as regularities of change in the edge temperature depending on the plasma parameters, are shown in the paper. Developed diagnostics provides the necessary data for the research of geodesic acoustic modes (GAM), which are strongly dependent on the ion plasma temperature, carried out on T-10.

Key words: T-10 tokamak, spectroscopy, doppler broadening, ion temperature, CXRS, GAM.

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-4-68-76

ВВЕДЕНИЕ

Для исследовательских программ, выполняемых в настоящее время на установках с магнитным удержанием, требуется подробная информация о параметрах плазмы не только в её центральных областях, но и на периферии шнура. Как правило, диагностики, задействованные для измерения локальных параметров в центре плазмы, не приспособлены к одновременным измерениям на периферии с той же степенью надёжности. Примером может служить существующая на токамаке Т-10 активная CXRS-диагностика [1], которая далеко не во всех случаях способна обеспечить надёжные измерения ионной

температуры в области токового лимитера с радиусом $a_L = 30$ см, поскольку в большинстве разрядов величина концентрации ядер углерода, входящая в структуру локальных CXRS-измерений ионной температуры, оказывается на периферии недостаточно большой. Причина в том, что ядра углерода на периферии шнура переходят в Н-подобный ион углерода C⁵⁺ вследствие перезарядки на атомах рабочего газа. Данный «перезарядочный» компонент концентрации иона C⁵⁺ совместно с его «ионизационным» компонентом, возникающим в процессе ионизационно-диффузионного переноса углерода с границы шнура в центр, образуют полный радиальный профиль иона C⁵⁺ в плазменном шнуре.

Из-за наличия двух источников формирования в плазме иона C⁵⁺ локализация его свечения в линии 5291 Å занимает в условиях Т-10 широкую пространственную зону $r = (0,7—1)a_L$, где r — координата вдоль малого радиуса токамака. Обработка многохордовых измерений спектральных контуров линии 5291 Å позволяет определить профиль ионной температуры в большей части указанной области шнура.

Измерения ионной температуры на периферии плазмы особенно актуальны ввиду проводящегося на Т-10 исследования геодезических акустических мод плазменных колебаний, закономерности развития которых в значительной степени определяются величиной температуры в зоне плазмы $\rho \sim 0,9$ [2].

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Методика определения периферийного профиля $T_i(r)$ из величины доплеровского уширения линии C⁵⁺ (5291 Å) состоит в следующем. В эксперименте измеряются спектры свечения линии 5291 Å иона C⁵⁺ одновременно по 13 выбранным хордам наблюдения. Интегрирование экспериментальных хордовых спектров $S(\lambda, x)$ (рис. 1, а) по длинам волн даёт распределение яркости линии 5291 Å по сечению шнура $J(x)^{\text{exper}}$, отнормированное на единицу в максимуме (рис. 1, б), где x — прицельный параметр хорды наблюдения. После этого для описания измеренного распределения яркости проводится абелизация $J(x)^{\text{exper}}$, т.е. подбирается радиальное распределение интенсивности линии в плазменном шнуре в виде гладкой функции $I(r)^{\text{exper}}$, соответствующая измеренным хордовым величинам яркости линии. На рис. 1, в показан периферийный участок такого радиального распределения интенсивности, отнормированный на единицу в максимуме. Отметим, что пространственная привязка измерений осуществляется с учётом имеющихся данных о смещении плазменного шнура вдоль большого радиуса токамака.

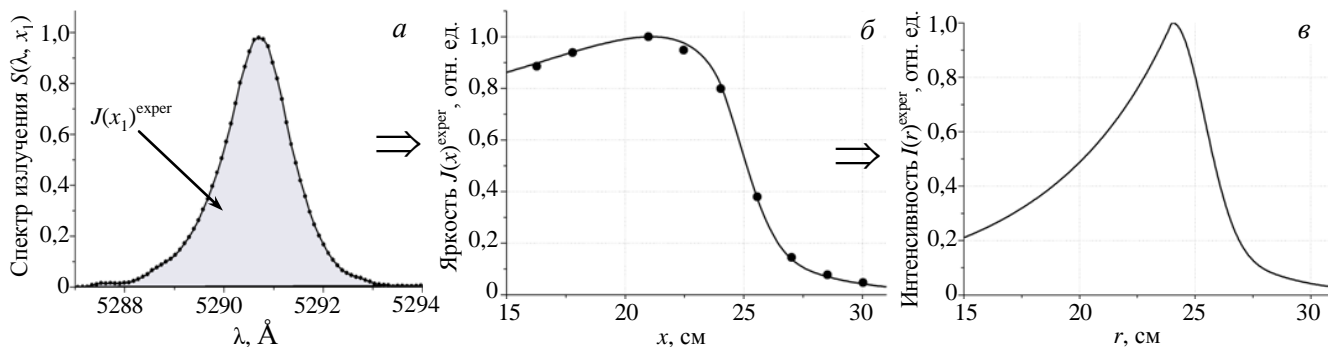


Рис. 1. Схема определения радиального распределения интенсивности линии C⁵⁺: а — спектр излучения $S(\lambda, x_1)$ линии 5291 Å, измеренный по хорде $x = x_1$; б — распределение яркости линии C⁵⁺ $J(x)^{\text{exper}}$; в — распределение интенсивности $I(r)^{\text{exper}}$

Работа диагностики основана на предположении о том, что свечение линии углерода является радиально симметричным, что подтверждается результатами измерений профилей свечения данной линии, проведёнными с помощью сканирующей диагностики распределения тормозного и линейчатого излучения на Т-10 [3].

Для определения периферийных значений T_i в расчётной модели задаётся пробный профиль ионной температуры в шнуре $T_i(r)^{\text{test}}$, который позволяет построить пробные локальные спектры линии $f(\lambda, T_i(r)^{\text{test}})$, формируемые эффектами доплеровского уширения, зеемановского расщепления, тонкой структурой линии в данной области шнура, а также аппаратной функцией измерительной системы. Суммируя пробные локальные спектры вдоль хорд наблюдения с весами, соответствующими интенсивностям $I(r)^{\text{exper}}$ на данном радиусе и длинам пересечения хорд с кольцами соответствующих радиусов, в пределах которых локальные величины $T_i(r)^{\text{test}}$ и $I(r)^{\text{exper}}$ считаются неизменными, можно получить набор пробных хордовых спектров $S(\lambda, x)^{\text{test}}$ линии 5291 Å, соответствующих пробному профилю $T_i(r)^{\text{test}}$. Подбирая методом итераций значения $T_i(r)^{\text{test}}$ и добиваясь на всех хордах наблюдения наилучшего совпаде-

ния пробных спектров с экспериментальными спектрами $S(\lambda, x)^{\text{exper}}$, можно с достаточной точностью определить абсолютную величину и профиль $T_i(r)$ на периферии плазменного шнура. Распределение ионной температуры предполагается радиально симметричным относительно центра плазменного шнура. Функция $T_i(r)^{\text{test}}$ задаётся гладкой, спадающей от центра к периферии шнура, что соответствует результатам CXRS-измерений ионной температуры.

Как показано в разделе «Совместные измерения с помощью CXRS и периферийной диагностики $T_i(r)$ » с наименьшей ошибкой измерения $T_i(r)$ могут быть проведены в пространственном диапазоне от границы шнура до максимума интенсивности линии 5291 Å.

Схожие диагностики периферийной ионной температуры, но требующие для своей реализации измерений профилей свечения и уширения линий целой последовательности ионов (например, C^{4+} , C^{3+} , C^{2+} и т.д.), были развиты на ряде установок [4—6]. Очевидным недостатком такого подхода в сравнении с описываемым методом является необходимость использования для своей реализации большого числа воспроизводящихся разрядов токамака. Кроме того, расчёты, приведённые в работе [6], показывают, что температура низкоионизованных ионов углерода может быть не выровнена с температурой рабочего газа плазмы из-за слишком малого времени ионизации данных ионов. Так, величины ионных температур, определяемых на Т-10 по величине доплеровского уширения линий углерода C^{2+} (4647 Å) и C^{1+} (6578 Å), оказываются на тех же радиусах шнура существенно ниже температур, определяемых по уширению линии 5291 Å иона C^{5+} .

Можно сформулировать условия надёжного определения ионной температуры с помощью предлагаемой методики:

— для измерения спектров линии C^{5+} должны использоваться приборы с достаточно высокими значениями дисперсии и спектрального разрешения, позволяющими проводить уверенное выделение доплеровского контура линии из его свёртки с аппаратной функцией регистрирующей аппаратуры;

— для определения пространственного распределения свечения линии 5291 Å и области локализации измерений температуры требуется проведение многохордовых измерений профиля яркости спектральной линии. Для снижения ошибки определения $T_i(r)$ необходимо использовать тот участок профиля свечения линии, на котором интенсивность линии растёт с уменьшением радиуса шнура. В случае значительной полоидальной неоднородности свечения необходимо проводить томографические измерения распределения яркости линии в сечении шнура;

— при модельном описании спектров необходимо учитывать все основные физические и аппаратные эффекты, вносящие вклад в форму спектра линии. Помимо эффекта Доплера, значительное влияние оказывают эффект Зеемана, тонкая структура линии и аппаратное уширение линии;

— при анализе достоверности получаемых данных о $T_i(r)$ необходимо проверять выполнение для иона C^{5+} условия $\tau_{\text{th}} < \tau_{\text{life}}$ для радиусов, на которых проводятся доплеровские измерения профиля $T_i(r)$.

СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

Описываемые далее измерения периферийных профилей $T_i(r)$ выполняются на токамаке Т-10 круглого сечения с параметрами: большой радиус $R = 1,5$ м, малый радиус $a = 0,3$ м, продольное магнитное поле до 3 Тл, ток плазмы до 400 кА, средняя плотность до 10^{20} м^{-3} , длительность разряда 1 с, мощность ЭЦР-нагрева до 2,5 МВт, длительность ЭЦР-нагрева до 400 мс.

Измерения проводятся в сечении D токамака (рис. 2), расположенном под 90° по тороидальному об-

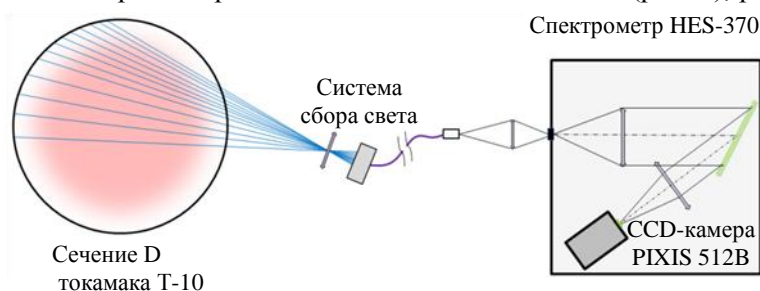


Рис. 2. Схема измерений периферийной ионной температуры на Т-10

ходу к круговому и рельсовому лимитерам. В данном сечении отсутствуют системы газонапуска и дополнительного нагрева плазмы. Такая схема наблюдения выбрана для того, чтобы обеспечить максимальное удаление от сильных локальных источников поступления частиц в плазму, влияющих на пространственное распределение свечения линии C^{5+} .

Свет из плазмы собирается в полоидальной плоскости системой сбора света с $f/d = 1/2,5$ (отношение фокусного расстояния к диаметру объектива) по 13 хордам наблюдения, которые могут располагаться в диапазоне от -20 см до $+35$ см по малому радиусу. Используемое спектральное оборудование задействовано также и в измерениях профиля яркости тормозного континуума с высоким спектральным разрешением [7], поэтому регистрация доплеровских спектров линии C⁵⁺ (5291 Å) обычно ведётся не только на периферии, но и в центральных областях плазмы. Относительная калибровка чувствительности измерительных каналов, необходимая для определения пространственного профиля свечения линии 5291 Å, проводится методом *in situ*. Методика такой калибровки с использованием инжектора быстрых нейтронов, расположенного в сечении D, описана в статье [7].

Спектры линии 5291 Å, собранные вдоль различных хорд наблюдения, передаются по 14-канальному кварцевому коллектору сечением 2×20 мм и длиной 40 м в спектроскопическую пульттовую, где проецируются через переходной объектив ($f/d = 1/1,5$) на входную щель светосильного ($f/d = 1/3,2$) спектрометра HES-370 с высоким спектральным разрешением. При обратной линейной дисперсии $D = 3,9$ Å/мм спектрометр обеспечивает в районе линии 5291 Å предельное спектральное разрешение до $\sim 0,2$ Å, в то время как для точных измерений формы спектрального контура линии иона C⁵⁺ достаточно располагать спектральным разрешением $0,3$ — $0,4$ Å. Излучение из плазмы, собранное вдоль многих хорд наблюдения, после разложения в спектр регистрируется на CCD-камеру PIXIS 512B с матрицей 512×512 и размером пиксела 24×24 мкм. Длительность экспозиции составляет от 50 до 100 мс при длительности разряда T-10 до 1 с, что позволяет отслеживать динамику профиля ионной температуры на периферии в процессе разряда.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕЧЕНИЯ ИОНА C⁵⁺

В условиях токамака T-10 максимум интенсивности свечения иона C⁵⁺ располагается в зависимости от параметров разряда в районе 22—27 см, причём свечение распространяется вплоть до задифрагментной области плазмы ($r > 30$ см). При этом измерения $T_i(r)$ наиболее достоверны в той зоне, где наблюдается значительный перепад яркости линии, т.е. в районе $r = 25$ —30 см. Важно отметить, что диагностика отработывалась в разрядах T-10, где одновременно проводились измерения профиля ионной температуры с помощью активной спектроскопической диагностики (CXRS), что позволяло сопоставить результаты обеих диагностик и независимо проверить справедливость методики измерения периферийного профиля $T_i(r)$ из спектра пассивного свечения линии C⁵⁺ (5291 Å).

Измеренное по хордам распределение яркости свечения линии 5291 Å для различных разрядов в сечении D показано на рис. 3, а. Радиальное распределение интенсивности, соответствующее измеренным хордовым сигналам, показано на рис. 3, б. Распределение свечения по радиусу сильно зависит от параметров плазмы и определяется, в первую очередь, величинами и профилями электронной температуры и плотности. Увеличение средней плотности плазмы приводит к смещению иона C⁵⁺ в шнура в область

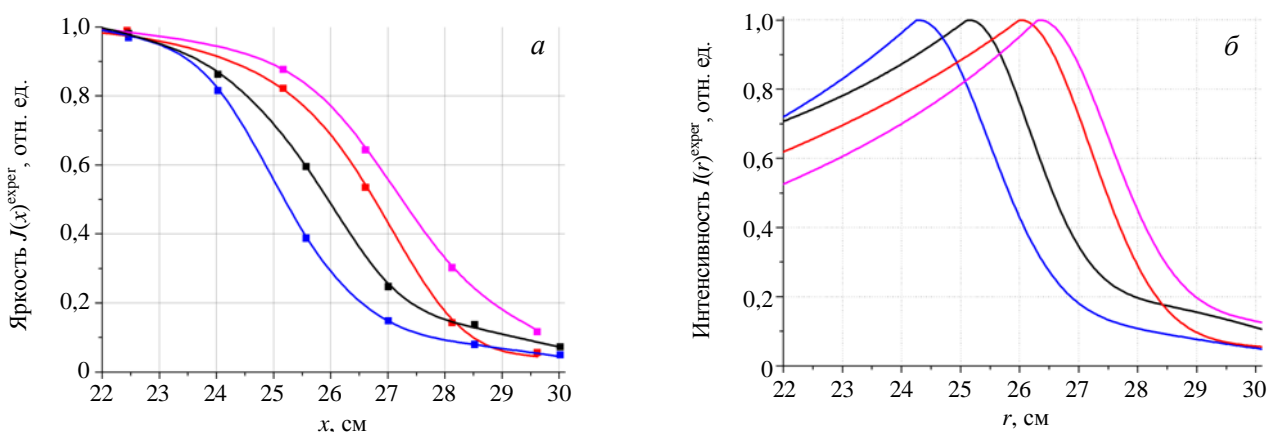


Рис. 3. Хордовые распределения яркости свечения $J(x)^{\text{expt}}$ линии 5291 Å иона C⁵⁺, измеренные в сечении D в разрядах с различными параметрами: — $I_p = 300$ кА, $\bar{n}_e = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, — $I_p = 300$ кА, $\bar{n}_e = 5,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, — $I_p = 200$ кА, $\bar{n}_e = 4,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, — $I_p = 200$ кА, $\bar{n}_e = 4,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $P_{\text{ЭДРН}} = 1$ МВт (а) и радиальное распределение интенсивности $I(r)^{\text{expt}}$ в тех же плазменных разрядах (б)

меньших T_e , при этом максимум радиального профиля свечения может сместиться с радиуса $r \approx 22$ см до радиуса $r \approx 26$ —27 см. В случае перехода к предельным плотностям плазмы, где наблюдается уменьшение электронной температуры T_e на границе, максимум свечения линии иона C^{5+} сдвигается вглубь шнура. При увеличении тока плазмы вследствие уширения профилей $T_e(r)$ и $n_e(r)$ максимум свечения смещается наружу. При включении ЭЦР-нагрева свечение углерода, как правило, также смещается наружу.

СТРУКТУРА ИЗМЕРЯЕМЫХ СПЕКТРОВ

В эксперименте измеряются спектральные контуры $S(\lambda, x)$ линии 5291 Å, на форму которых влияют как доплеровское уширение, тонкая структура линии и расщепление за счёт эффекта Зеемана, так и аппаратная функция спектрометра. Задача по определению ионной температуры требует учёта всех основных эффектов, влияющих на форму спектра.

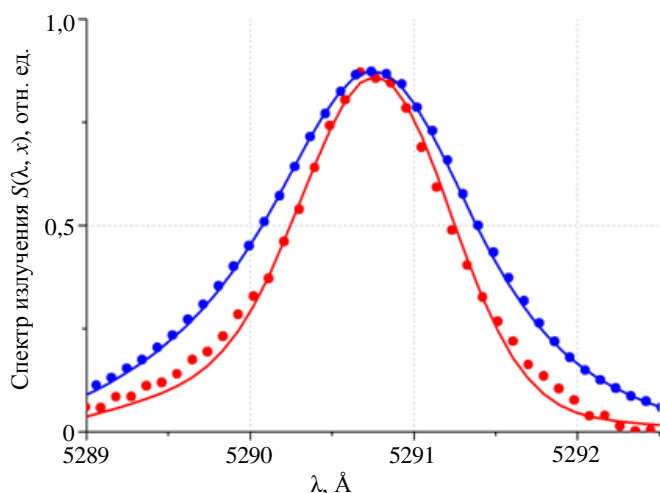


Рис. 4. Измеренные спектры $S(\lambda, x)$ линии C^{5+} (5291 Å) в омическом разряде с параметрами $I_p = 300$ кА, $\bar{n}_e = 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$: ● — спектр по хорде $x = 30$ см; ● — спектр по хорде $x = 24$ см; —, — — модельное описание спектров

Примеры измеренных спектров по двум хордам наблюдения ($x = 24$ см и $x = 30$ см) в разряде с параметрами $I_p = 300$ кА, $\bar{n}_e = 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ показаны на рис. 4. Точки соответствуют экспериментальным спектрам, сплошными линиями показано описание измеренных спектров в модели с учётом всех основных факторов, влияющих на форму линии, в том числе с учётом профиля ионной температуры. Спектральная ширина линии C^{5+} на различных хордах заметно отличается из-за различного доплеровского уширения, обусловленного влиянием пространственного распределения ионной температуры. Можно видеть, что экспериментальные и расчётные контуры линии на рис. 4 имеют характерные отклонения от гауссовской формы в виде обострённых вершин и уширенных крыльев контуров, связанных с тем, что вклад в спектр вносят зоны плазмы с существенно различными величинами ионной температуры, что особенно заметно при регистрации сигнала по центральным хордам наблюдения.

Спектральная асимметрия линии 5291 Å, выражающаяся в завышении сигнала в коротковолновой области спектра, обусловлена характерной тонкой структурой линии. Данные о структуре расщепления получены из базы атомных данных ADAS [8].

Отметим, что заселение уровней тонкой структуры, а с ним и форма спектра линии 5291 Å оказываются различными в зависимости от того, какой из процессов доминирует в заселении уровней: электронный удар или перезарядка ядер углерода на атомах дейтерия. Проведённые эксперименты показали, что характерная форма спектра линии 5291 Å соответствует возбуждению её свечения преимущественно за счёт электронного удара. Действительно, несмотря на то, что в свечении линии 5291 Å присутствует значительный «перезарядочный» компонент, основным каналом её возбуждения является не прямая перезарядка атомов дейтерия на возбуждённый уровень $n = 8$ иона C^{5+} , а увеличение свечения за счёт процесса перезарядки ядер концентрации иона C^{5+} в основном состоянии $n = 1$ с последующим возбуждением из него уровня $n = 8$ электронным ударом.

Наблюдаемые отклонения от модельного описания спектра линии 5291 Å, измеренного по хорде $x = 30$ см, на удалении ~ 1 Å от максимума линии связаны с излучением молекулярных линий рабочего газа. Как правило, молекулярные линии не могут заметно исказить измеряемые спектры, за исключением периферийных областей шнура и в случае предельно чистой плазмы, где практически отсутствует примесь углерода.

Важный вклад в форму спектра вносит эффект Зеемана, связанный с расщеплением линии в сильном магнитном поле. Поскольку на внешнем и внутреннем обводах Т-10 магнитное поле отличается до

1,5 раза, то при описании в модели измеренных спектров учитывается влияние распределения тороидального магнитного поля на форму линии.

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Для измерения профиля ионной температуры обработка эксперимента производится итерационным методом. В модель закладывается предполагаемый профиль ионной температуры, затем проводится расчёт спектров линии C⁵⁺ на каждом измерительном канале с учётом пробного профиля температуры и измеренного профиля интенсивности линии 5291 Å, после чего расчётные спектры сравниваются с экспериментальными. Критерием правильности подобранного профиля температуры является наименьшее отклонение модельных спектров от измеренных по всем хордам наблюдения.

На рис. 5 представлены профили периферийной ионной температуры, измеренные в омических разрядах с различными параметрами. Поведение периферийной температуры T_i в омических разрядах демонстрирует следующие основные закономерности: величина T_i растёт с ростом тока плазмы и уменьшением величины средней плотности, при этом величина граничной температуры $T_i(a_L)$ на радиусе рельсового лимитера ($r = 30$ см) изменяется, как правило, в диапазоне 40—60 эВ. Измерения электронной температуры за диафрагмой на $r \geq 30$ см с помощью зондов Ленгмюра демонстрируют близкие, но в целом на 15—20% меньшие величины граничной электронной температуры $T_e(a_L)$, а также схожие закономерности изменения граничных значений T_i и T_e в зависимости от параметров плазмы [9].

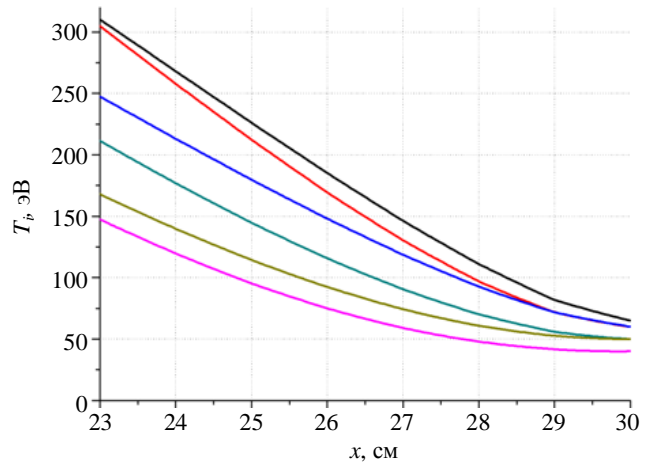


Рис. 5. Распределение периферийной ионной температуры в омических разрядах с параметрами: $I_p = 300$ кА, $\bar{n}_e = 2,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (—); $I_p = 300$ кА, $\bar{n}_e = 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (—); $I_p = 250$ кА, $\bar{n}_e = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (—); $I_p = 220$ кА, $\bar{n}_e = 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (—); $I_p = 180$ кА, $\bar{n}_e = 1,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (—); $I_p = 180$ кА, $\bar{n}_e = 2,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (—)

СОВМЕСТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ CXRS И ПЕРИФЕРИЙНОЙ ДИАГНОСТИКИ $T_i(r)$

На рис. 6 представлены профили ионной температуры, полученные в основной части плазмы с помощью CXRS-измерений, на периферии — с помощью описываемой диагностики. В большинстве случаев CXRS-диагностика T-10 не может дать информацию о величине T_i в районе $r \sim 30$ см из-за малой величины полезного сигнала, что связано с низкой концентрацией ядер углерода на периферии. Тем не

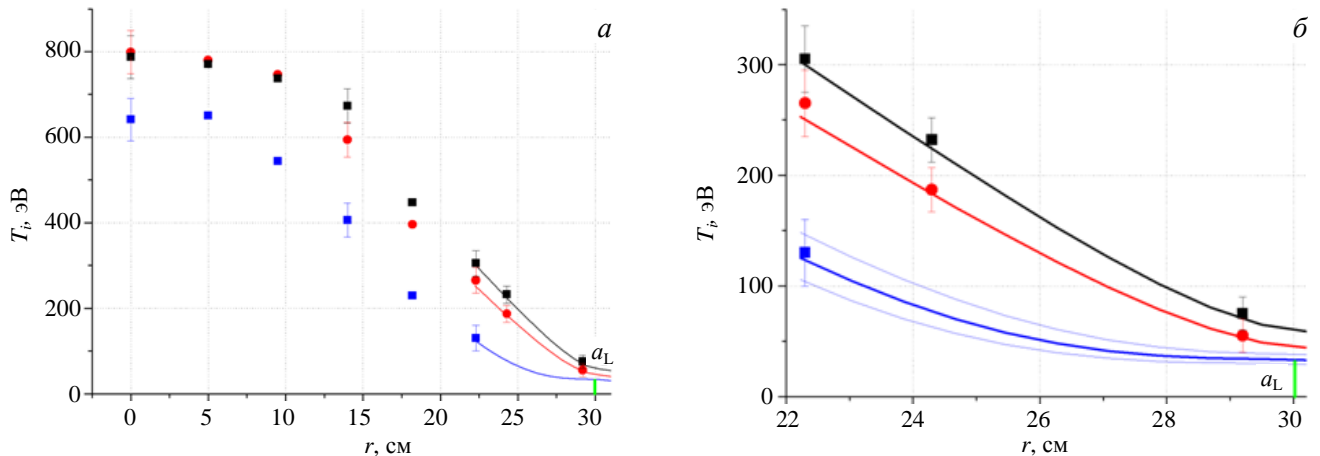


Рис. 6. Профили ионной температуры в омических разрядах с параметрами: $I_p = 220$ кА, $\bar{n}_e = 2,9 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (●), $I_p = 270$ кА, $\bar{n}_e = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (■), $I_p = 150$ кА, $\bar{n}_e = 2,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (■) (а) и результаты CXRS-измерений профиля $T_i(r)$: —, —, — участки $T_i(r)$, полученные с помощью пассивной диагностики (б)

менее при усреднении экспериментальных CXRS-спектров, полученных в нескольких повторяющихся разрядах, величины T_i , локально измеренные с помощью активной диагностики в области $r = 22\text{—}29$ см, хорошо совпадают с данными диагностики периферийной температуры. Проведённая проверка диагностики с помощью CXRS-измерений позволила отработать методику измерений полного профиля ионной температуры, включая периферийную область плазмы. На рис. 6, б показан характерный уровень возможной ошибки определения $T_i(r)$, наименьший на самой границе плазмы и постепенно нарастающий вглубь плазмы. Такая динамика ошибки определения $T_i(r)$ в основном связана с нарастанием ошибки восстановления радиального профиля свечения линии по мере приближения к центру шнура.

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ ДИАГНОСТИКИ

Отдельно следует рассмотреть ограничения применимости описываемого метода и точность проводимых измерений. По точности определения $T_i(r)$ можно выделить два участка профиля свечения линии 5291 Å: периферийный участок, на котором свечение линии быстро нарастает с уменьшением радиуса шнура, и участок спадания свечения при приближении к центру шнура. Наименьшая ошибка определения профиля $T_i(r)$ окажется на первом участке профиля свечения, где в суммарном спектре линии 5291 Å, измеренном вдоль хорды x , будет с наибольшим весом представлен доплеровский контур линии из зоны шнура с радиусом $r = x$. Это обстоятельство позволяет избежать характерных ошибок определения $T_i(r)$, связанных с абелизацией, которые окажутся на первом участке значительно меньше, чем на внутреннем участке профиля свечения.

Для того чтобы оценить корректность определения локальных величин ионной температуры на заданном радиусе x из проводимых хордовых измерений, можно рассмотреть величину отношения сигнала, поступающего с радиуса $r = x$, к полной величине сигнала, собранного по заданной хорде:

$$F(x) = \frac{L(x, r=x)I(r=x)}{\sum L(x, r)I(r)},$$

где $I(r)$ — величина интенсивности свечения линии на радиусе r ; $L(x, r)$ — длина пересечения хорды наблюдения x с кольцом радиуса r . Для наглядности приведён рис. 7, а, где показаны все используемые величины.

В результате получается зависимость параметра F от координаты хорды наблюдения x , представленная на рис. 7, б сплошной кривой. Для расчёта было задано радиальное распределение яркости линии, показанное на рисунке пунктирной кривой, шаг разбиения составляет 1 см, что соответствует пространственному разрешению измерений. Можно видеть, что при проведении хордовых измерений во

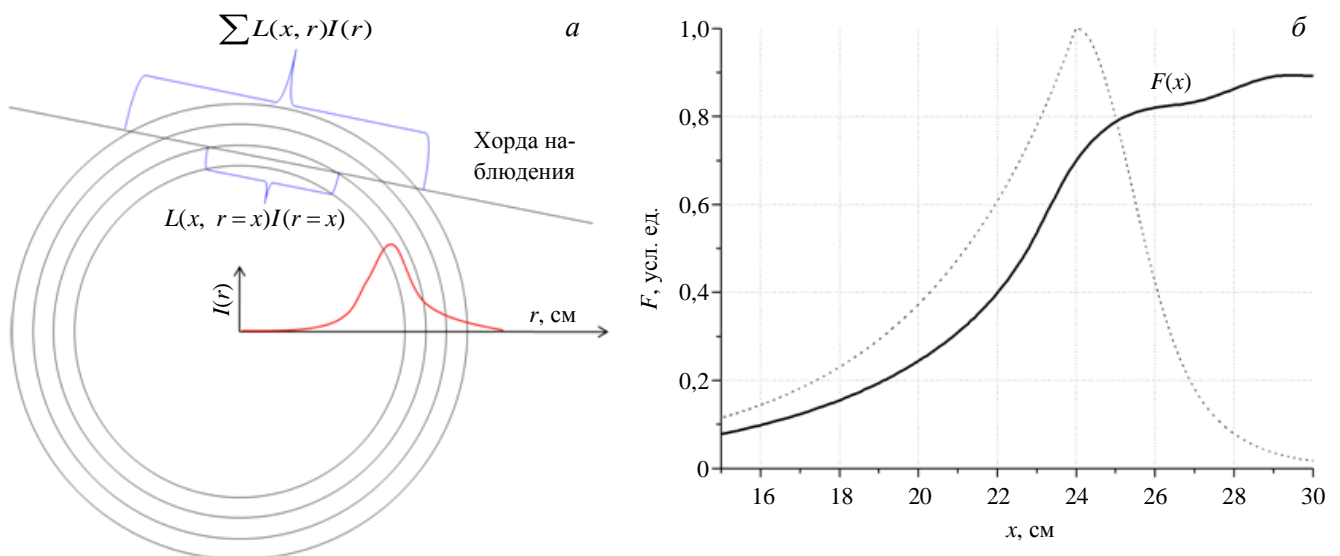


Рис. 7. Схема построения параметра $F(x)$, определяющего долю сигнала, собранного на радиусе $r = x$, относительно полной величины сигнала, полученного вдоль заданной хорды наблюдения (а), и зависимость параметра F от положения хорды наблюдения при заданном радиальном распределении интенсивности свечения линии (.....)

внешней области шнура, где наблюдается сильный перепад интенсивности линии, более 80% сигнала, собранного вдоль хорды наблюдения, направленной на радиус $r = x$, поступает именно с данного радиуса, и только меньшая часть сигнала обусловлена влиянием более периферийных областей шнура. Это связано с высокой производной нарастания вглубь шнура интенсивности линии углерода на периферии, что позволяет проводить здесь измерения ионной температуры с высокой точностью.

Резкий спад величины F наблюдается в более глубоких областях шнура, что сильно затрудняет проведение измерений температуры в этой области. Таким образом, область надёжного диагностирования периферийного профиля $T_i(r)$ фактически ограничена зоной шнура, располагающейся снаружи от максимума интенсивности спектральной линии 5291 Å. В более глубоких областях плазмы Т-10 надёжные данные о величинах ионной температуры обеспечиваются CXRS-диагностикой.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Применимость метода на Т-10. Применимость предложенного метода измерения периферийного профиля $T_i(r)$ для условий Т-10 во многом определяется уверенным выполнением в плазме соотношения $\tau_{th} < \tau_{life}$, где τ_{th} — время термализации иона C^{5+} в плазме, τ_{life} — приведённое время жизни иона C^{5+} относительно процессов ионизации иона C^{5+} , его перезарядки на атомах дейтерия и ухода на лимитер. Расчёты в модели [10] показывают, что в самом критичном случае чистой дейтериевой плазмы, где время термализации τ_{th} иона C^{5+} окажется наибольшим, время жизни иона τ_{life} во всём сечении шнура (даже в условиях разрядов установки с высокой плотностью и мощного ЭЦР-нагрева) будет намного больше времени его термализации, что обеспечивает применимость предложенного метода в любых условиях работы Т-10. Применимость метода для измерений периферийного профиля $T_i(r)$ на других установках должна оцениваться для каждого случая отдельно.

Характерные закономерности периферийной T_i на Т-10. Можно предложить следующее объяснение для наблюдаемого в эксперименте роста периферийных значений T_i с ростом разрядного тока и для их снижения при увеличении плотности плазмы. Рост температуры ионов на периферии, наблюдаемый с увеличением разрядного тока, можно связать с одновременным уширением профиля плотности тока, приводящим к уширению профилей остальных параметров плазмы.

Снижение T_i на периферии при увеличении плотности плазмы логично связать с увеличением газонапуска дейтерия, вызывающего рост перезарядочных и конвективных потерь тепла из ионного компонента. Влияние роста плотности и газонапуска на периферийные значения T_i усиливается также за счёт одновременного роста излучательных и конвективных потерь тепла из электронного компонента, что приводит к уменьшению температуры электронов на периферии и к снижению передачи тепла от электронов ионам. В разряде, сильно загрязнённом лёгкими примесями, увеличение плотности плазмы может приводить к существенному уменьшению электронной температуры на периферии вследствие эффективного роста излучательных потерь. В результате на периферии может возникнуть обратная передача тепла от ионов к электронам, приводящая к значительным потерям тепла из ионного компонента.

Область научного применения диагностики на Т-10. Созданная диагностика периферийного профиля $T_i(r)$ может быть с высокой эффективностью применена в таких научно-исследовательских программах Т-10, как:

- исследование переноса тепла в ионном и электронном компонентах на периферии плазмы;
- изучение развития ITG-моды в разрядах с предельной плотностью плазмы [11] и формирование пинча тепла электронов в разрядах с предельной величиной β_J [12];
- формирование H-моды в ЭЦРН-разрядах с пеллет-инжекцией дейтерия [13];
- исследование эффективности работы литиевой диафрагмы [14] по защите вольфрамового лимитера Т-10 при мощном ЭЦР-нагреве и т.д.;
- исследование геодезических акустических мод (ГАМ) плазменных колебаний [15, 16];
- анализ и моделирование динамики радиального электрического поля [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На токамаке Т-10 создана диагностика ионной температуры, позволяющая определять за один разряд токамака профиль $T_i(r)$ в периферийной области плазмы. Определение $T_i(r)_{a_L}$ осуществляется из измерений доплеровского уширения спектральной линии углерода C^{5+} (5291 Å), зона свечения которой в плазме Т-10 занимает всю периферийную область шнура $r = (0,7—1,1)$. Область надёжного диагностирования периферийного профиля $T_i(r)$ занимает в шнуре пространственный интервал ~ 5 см, заданный расстоянием между максимумом интенсивности спектральной линии 5291 Å и границей плазменного шнура. Возможная ошибка измерений температуры не превышает 15—20%. Естественный предел применимости метода задаёт малость концентрации углерода в чистой плазме с $Z_{эф} \approx 1$, где надёжному измерению доплеровского спектра линии C^{5+} (5291 Å) начинает мешать молекулярный спектр дейтерия.

Измерения периферийной ионной температуры позволили выявить закономерности её изменения в зависимости от параметров плазмы, а именно рост температуры на границе с ростом тока и уменьшением плотности плазмы. Характерное значение ионной температуры на радиусе токовой диафрагмы $a_L = 30$ см для омических разрядов Т-10 составляет $T_i(a_L) = 40—60$ эВ.

Результаты CXRS- и периферийной диагностики T_i хорошо согласуются друг с другом, подтверждая корректность проводимых на Т-10 измерений профиля $T_i(r)$. Совместная работа двух диагностик обеспечивает надёжные измерения полного профиля ионной температуры от центра шнура до лимитера, что заметно усиливает экспериментальную базу Т-10 и позволяет выполнять на токамаке широкий набор программ по исследованию физики переноса тепла и частиц, а также исследования геодезических акустических мод (ГАМ) плазменных колебаний, которые могут в значительной степени определять природу транспортных процессов в плазме.

Авторы выражают благодарность научному и техническому коллективу токамака Т-10 за обеспечение работы экспериментальной установки и её диагностических систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-32-00148 мол_а) и за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00193).

REFERENCES

1. **Krupin V.A., Klyuchnikov L.A., Korobov K.V., Nemets A.R., Nurgaliev M.R., Gorbunov A.V., Naumenko N.N., Troynov V.I., Tugarinov S.N., Fomin F.V.** Modernized active spectroscopic diagnostics (CXRS) of the T-10 tokamak. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2014, vol. 37, issue 4, pp. 60—70 (in Russian).
2. **Melnikov A.V. et al.** — Nuclear Fusion, 2015, vol. 55, p. 063001.
3. **Nemets A.R., Krupin V.A., Klyuchnikov L.A., Korobov K.V., Nurgaliev M.R.** The radial scanning diagnostics of the bremsstrahlung and line emission in T-10 plasma. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 4, pp. 96—102 (in Russian).
4. **Pel'aez R.J. et al.** — J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2010, vol. 43, p. 144016.
5. **Biewer T.M. et al.** — Rev. Sci. Instrum., 2004, vol. 75, p. 650.
6. **Hey J.D. et al.** — J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2002, vol. 35, pp. 1525—1553.
7. **Klyuchnikov L.A., Nemets A.R., Krupin V.A., Korobov K.V., Nurgaliev M.R., Naumenko N.N., Tugarinov S.N., Den'shchikov D.S.** Multichannel measurements of effective plasma charge in T-10 tokamak using visible bremsstrahlung intensity under high spectral resolution. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 4, pp. 34—40 (in Russian).
8. **The Atomic Data and Analysis Structure (ADAS)**; <http://www.adas.ac.uk/>.
9. **Solomatin R.Y. et al.** — In: 41st EPS Conf., 2014, P4.038.
10. **Dux R.** — STRAHL User Manual Laborbericht 10/30, IPP. Garching, September 2006.
11. **Vershkov V.A. et al.** — Nucl. Fusion, 2005, vol. 45, S203.
12. **Gao C. et al.** — Nucl. Fusion, 2014, vol. 54, p. 083025.

13. **Kislov D.A. et al.** — Nucl. Fusion, 2001, vol. 41, p. 1473.
14. **Mirnov S.V. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2006, vol. 48, p. 821.
15. **Melnikov A.V. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2006, vol. 48, S87.
16. **Melnikov A.V. et al.** — Pis'ma v ZhETF (Letters to JETPh), 2014, vol. 100, pp. 633—638 (in Russian).
17. **Melnikov A.V. et al.** — Nuclear Fusion, 2013, vol. 53, p. 093019.

AUTHORS

Krupin V.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Krupin_VA@nrcki.ru
Klyuchnikov L.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Nurgaliev M.R. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Nemets A.R. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Korobov K.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Zemtsov I.A. 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

Received 11 August 2016
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2016, vol. 39, issue 4, pp. 68—77.