

УДК 533.9.082

МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА (CXRS) ТОКАМАКА Т-10

*В.А. Крупин¹, Л.А. Ключников¹, К.В. Коробов¹, А.Р. Немец¹, М.Р. Нургалиев¹,
А.В. Горбунов¹, Н.Н. Науменко², В.И. Тройнов¹, С.Н. Тугаринов¹, Ф.В. Фомин¹*

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Институт физики НАН Республика Беларусь, Минск, Республика Беларусь

В данной работе приведены результаты модернизации активной спектроскопической диагностики (CXRS) [1] на токамаке Т-10. Актуальность работы обусловлена важностью измерений ионной температуры и концентрации ядер рабочего газа и примесей для исследования транспортных процессов в ионном компоненте плазмы. Измерения радиальных профилей ионной температуры крайне важны для исследования поведения геодезической акустической моды (ГАМ), проводящегося на Т-10 [2]. В статье описывается модернизированная схема CXRS-измерений, а также конструкция и особенности работы созданного для новой диагностики спектрометра. Подробно рассмотрены методы регистрации и обработки полученных данных, уделено внимание проблеме калибровки всего комплекса оборудования. Проведённые модификации диагностики позволили вести одновременные измерения в трёх спектральных диапазонах: в районе линии H_{α} пучка, CXRS-линии иона углерода C^{5+} и CXRS-линии одного из водородоподобных ионов He^{1+} , Li^{2+} , N^{6+} , O^{7+} или Ne^{9+} . Это дало возможность измерять профили концентрации одновременно двух примесей плазмы, а также ионную температуру по CXRS-линиям различных элементов. Модернизированная диагностика существенно расширила возможности исследования физики транспортных процессов и квазикогерентных мод плазменных колебаний на Т-10.

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

MODERNIZED ACTIVE SPECTROSCOPIC DIAGNOSTICS (CXRS) OF THE T-10 TOKAMAK

*V.A. Krupin¹, L.A. Klyuchnikov¹, K.V. Korobov¹, A.R. Nemets¹, M.R. Nurgaliev¹, A.V. Gorbunov¹,
N.N. Naumenko², V.I. Troynov¹, S.N. Tugarinov¹, F.V. Fomin¹*

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²Institute of Physics NASB, Minsk, Republic of Belarus

This article presents the results of the modernization of Charge eXchange Recombination Spectroscopy (CXRS) [1] on T-10 tokamak. Relevance of this work is specified by the importance of measurements of ion temperature and nuclei density of impurities and main species for ion transport analysis. Understanding of radial dependence of ion temperature is necessary for geodesic acoustic mode behavior investigation which is currently performed on T-10 [2]. The modernized schematic of CXRS measurements is described, as well as the design of the spectrometer created from this modernization. Principles of data registration and further processing are examined. Attention to the problem of equipment calibration is granted. The introduced changes led to simultaneous measurements in three spectral intervals: beam line H_{α} region, CXRS line of carbon ion C^{5+} , and one of the hydrogen-like ions He^{1+} , Li^{2+} , N^{6+} , O^{7+} or Ne^{9+} . These capabilities allow simultaneous measure of density profiles of two impurities and ion temperature from various elements' lines. The improved diagnostics significantly broadens possibilities to investigate the physics of transport processes and quasicohherent modes of plasma oscillations on T-10.

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

ВВЕДЕНИЕ

Активная спектроскопическая диагностика CXRS (Charge eXchange Recombination Spectroscopy) является эффективным инструментом, позволяющим измерять локальные значения ионной температуры $T_i(r)$, концентрации ядер рабочего газа $n_i(r)$ и ядер примесей $n_z(r)$, скорости тороидального $V_t(r)$ и полоидального $V_p(r)$ вращения плазмы. Важность измерений перечисленных параметров для изучения физических процессов в плазме, выполняемых в рамках унитарной диагностики, привела к широкому распространению методов CXRS-измерений на большинстве плазменных установок с магнитным удержанием. Наиболее подробно принципы и детали работы CXRS-диагностики описаны в [3].

В статье описывается модернизированная схема CXRS-измерений на Т-10. Подробно рассмотрены конструкция и принцип работы созданного для этой цели нового спектрометра — основного спектрального элемента диагностики. Обсуждены методы регистрации и обработки данных при проведении изме-

рений профилей ионной температуры $T_i(r)$ и концентрации ядер примесей $n_Z(r)$. Особое внимание уделено способам калибровки всего спектрального комплекса. В результате проведенной модернизации диагностика позволяет измерять профили концентрации одновременно двух примесей плазмы, а также ионную температуру одновременно по CXRS-линиям двух различных элементов. В Заключении указаны перспективы дальнейшего развития CXRS-комплекса на Т-10.

СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

Рассматриваемая CXRS-диагностика предназначена для изучения переноса тепла и частиц в условиях Т-10 — токамака круглого сечения со следующими параметрами: большой радиус тора $R = 150$ см, малый радиус $a_L = 30$ см, продольное магнитное поле $B_t \leq 3$ Тл, ток плазмы $I_p \leq 400$ кА, линейная средняя плотность $\bar{n}_e \leq 10^{20}$ м⁻³, длительность разряда ~ 1 с, мощность дополнительного ЭЦР-нагрева $P_{\text{ECR}} \leq 2,5$ МВт при длительности ≤ 400 мс.

Модернизированная схема CXRS-диагностики показана на рис. 1. Базовым элементом диагностики является диагностический инжектор ДИНА-6 [4] со следующими параметрами: энергия основного компонента 30 кэВ, плотность тока ~ 10 мА/см², диаметр пучка 5 см. Инжектор работает в импульсном режиме, производя за разряд токамака ~ 10 импульсов длительностью 1 мс с периодом 43 мс. Важной особенностью инжектора ДИНА-6 является использование в его схеме дугового источника плазмы, что обеспечивает преобладание основного энергетического компонента E_0 в спектре пучка $n(E_0):n(E_0/2):n(E_0/3) = 0,85:0,09:0,06$, что упрощает измерение концентрации ядер примесей.

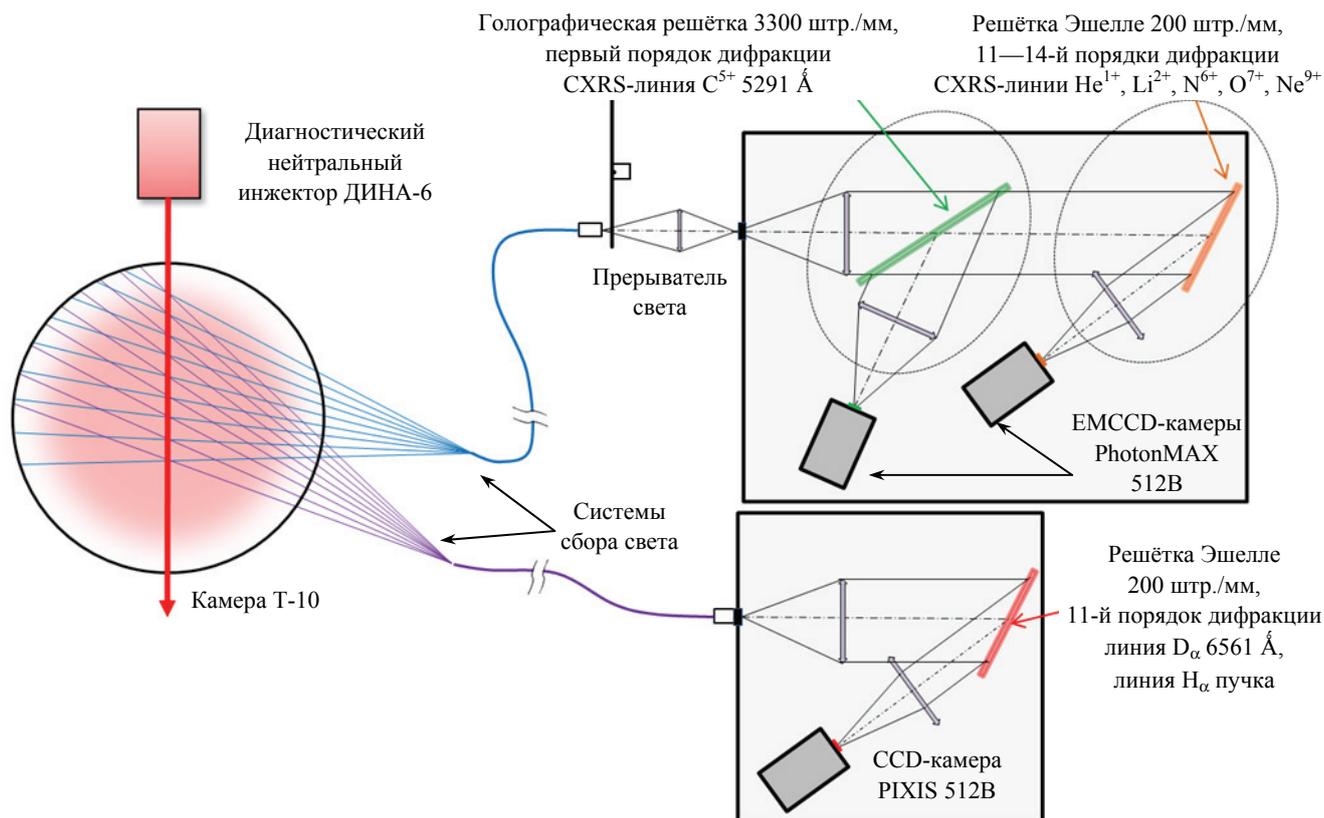


Рис. 1. Схема CXRS-диагностики Т-10

Для CXRS-измерений ионной температуры и концентрации примесей используются две независимые системы сбора света. Каждая из систем позволяет проводить локальные измерения параметров T_i и n_Z одновременно в девяти пространственных точках пересечения хорд наблюдения с диагностическим пучком, обеспечивая пространственное разрешение измерений 2,5—4 см. Временное разрешение диагностики определяется длительностью импульса нейтрального пучка и составляет 1 мс.

Свет от систем сбора передаётся по двум кварцевым оптоволоконным коллекторам в спектроскопическую пульттовую. Каждая система сбора регистрирует свет по девяти пространственным каналам, равномерно распределённым в области шнура $-0,3a_L - a_L$, где a_L — радиус рельсового лимитера Т-10, равный 30 см.

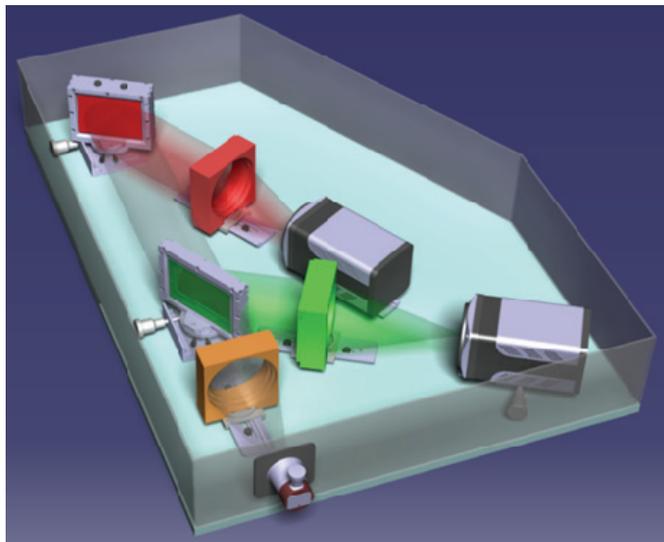


Рис. 2. Составной спектрометр HES13

Система регистрации спектров состоит из трёх научных камер и трёх спектрометров HES (High Etendue Spectrometer — светосильный спектрометр) (см. таблицу). Спектрометры с отражающими решётками обозначаются HES1 и HES2, с голографической решёткой HES3, при этом спектрометры HES1 и HES3 объединены друг с другом, образуя составной спектрометр HES13. Макетное изображение спектрометра HES13 показано на рис. 2.

В качестве детекторов в сборке HES13 используются две EMCCD-камеры PhotonMAX 512B с параметрами: матрица 512×512 пикс., размер пикселя 16×16 мкм, один кадр за 4,3 мс. Спектрометр HES2 оснащён CCD-камерой PIXIS 512B с параметрами: матрица 512×512 пикс., размер пикселя 24×24 мкм, один кадр за 43 мс. Спектрометры HES1 и HES2 выполнены на базе отражающей дифракционной решётки Эшелле 200 штр./мм, работающей в 11—14-х порядках дифракции. В схеме HES3 использована прозрачная голографическая дифракционная решётка 3300 штр./мм, работающая в первом порядке дифракции.

Спектрометры HES1 и HES2 выполнены на базе отражающей дифракционной решётки Эшелле 200 штр./мм, работающей в 11—14-х порядках дифракции. В схеме HES3 использована прозрачная голографическая дифракционная решётка 3300 штр./мм, работающая в первом порядке дифракции.

Параметры используемых спектрометров

Параметр	HES1, HES2	HES3
Относительное отверстие спектрометра	1/3,2	1/3,2
Обратная линейная дисперсия, Å/мм	3,2—5,2	3,78
Предельное спектральное разрешение, Å	0,19	0,17
Увеличение по спектру	1,9	1
Пропускание	>30%	>40%

Основная идея сборки двух спектрометров в единый HES13 состоит в организации одновременных измерений в двух спектральных диапазонах строго в одних и тех же точках пространства с использованием одной системы сбора и передачи света.

Для этого в схеме составного спектрометра первым смонтирован спектрометр HES3 с прозрачной голографической дифракционной решёткой (с рабочим диапазоном в районе CXRS-линии углерода C^{5+} 5291 Å). Эффективность дифракции решётки на длине волны 5291 Å порядка 50%, при этом излучение на всех остальных длинах волн проходит через прозрачную решётку насквозь с малым ослаблением (порядка 15—20%). Прошедший через прозрачную решётку «белый свет» подвергается заключительной дифракции на отражающей решётке Эшелле 200 штр./мм.

В схеме регистрации спектров используется прерыватель света (рис. 3), совмещающий в себе функции синхронизации и защиты камер от паразитного излучения, идущего из плазмы до и после интервала экспозиции камер.

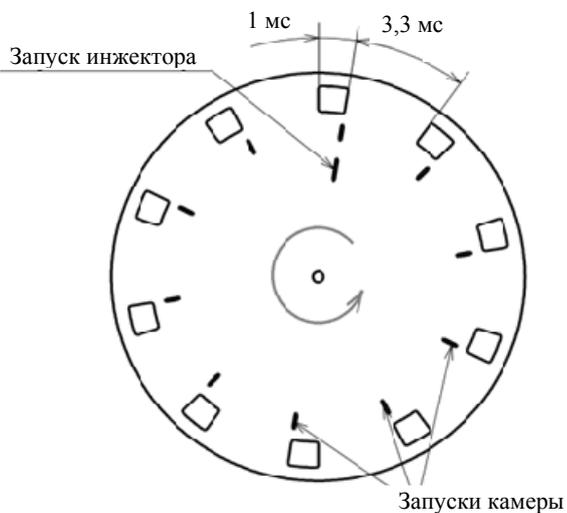


Рис. 3. Прерыватель света

Временная диаграмма работы CXRS-диагностики на Т-10 представлена на рис. 4. Прерыватель с помощью 10 щелевых прорезей и оптопары генерирует синхроимпульсы на запуск инжектора и экспозиции камер. За один оборот диска (43 мс) EMCCD-камеры спектрометра HES13 регистрируют один спектр в момент инжекции пучка и девять спектров без пучка.

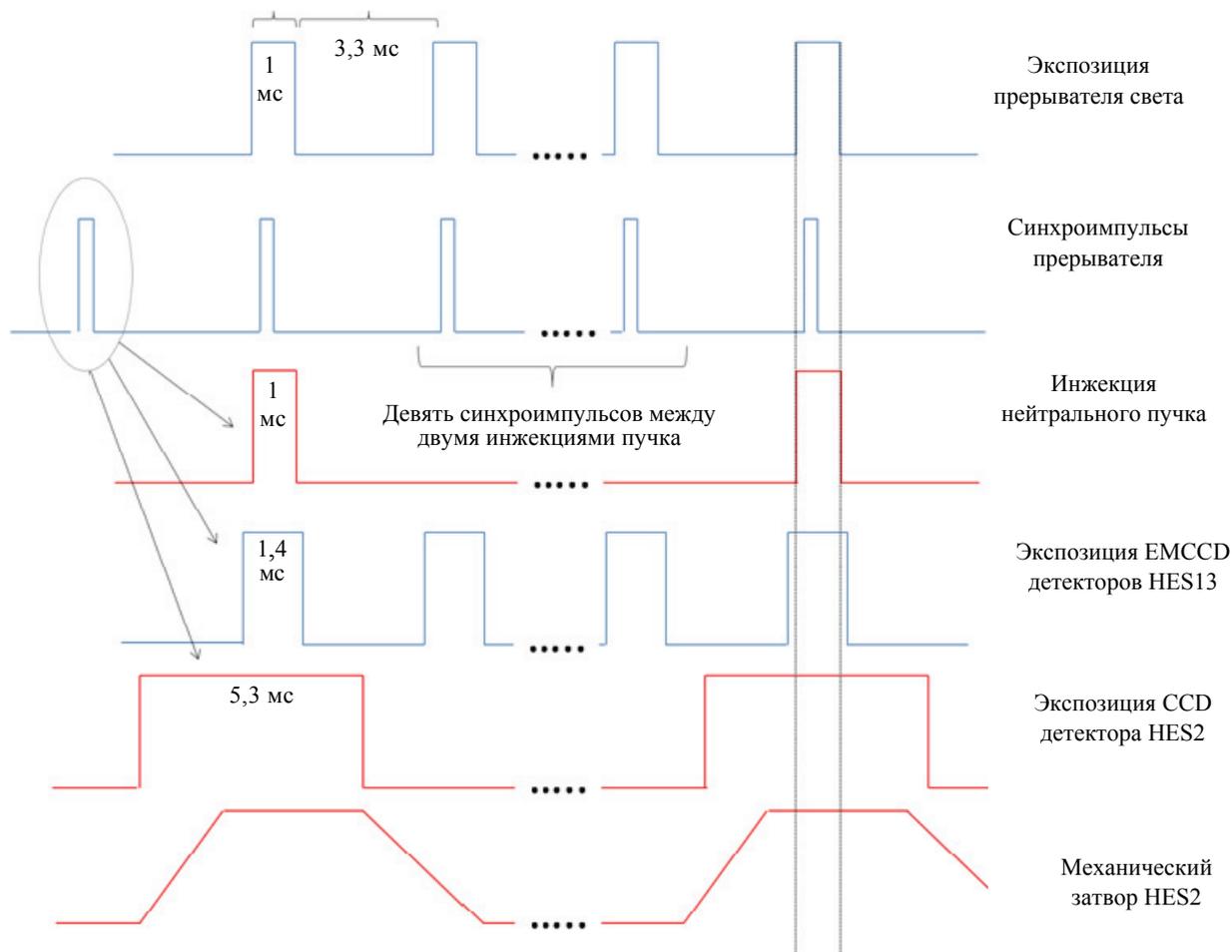


Рис. 4. Временные диаграммы работы CXRS-диагностики

Регистрация спектров без пучка позволяет осуществить временную разностную схему CXRS-измерений, которая заключается в вычитании пассивного спектра (без пучка) из суммарного спектра, снятого в момент инжекции пучка.

Время экспозиции EMCCD-камер спектрометра HES13 составляет 1,4 мс, что превышает время поступления света на камеру через прерыватель (1 мс). Это сделано для того, чтобы уберечься от возможных проблем с рассинхронизацией и избежать «смазов» на камерах до и после экспозиции.

Спектрометр HES2 оснащён CCD-камерой PIXIS 512B с большим временем считывания, что не позволяет организовать разностную схему измерений. Поэтому эта камера в условиях CXRS-измерений Т-10 практически пригодна только для регистрации спектров H_{α} пучка, где не обязательно использование разностной схемы. Экспозиция CCD-камеры составляет 5,3 мс, что также превышает время работы инжектора (1 мс), что связано с работой механического шаттера данной камеры, которому требуется порядка 2—2,5 мс на то, чтобы полностью открыться после получения синхроимпульса.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Для получения информации о величине ионной температуры в экспериментах на токамаках в основном используется уширение CXRS-линий лёгких примесей, расположенных в удобной для регистра-

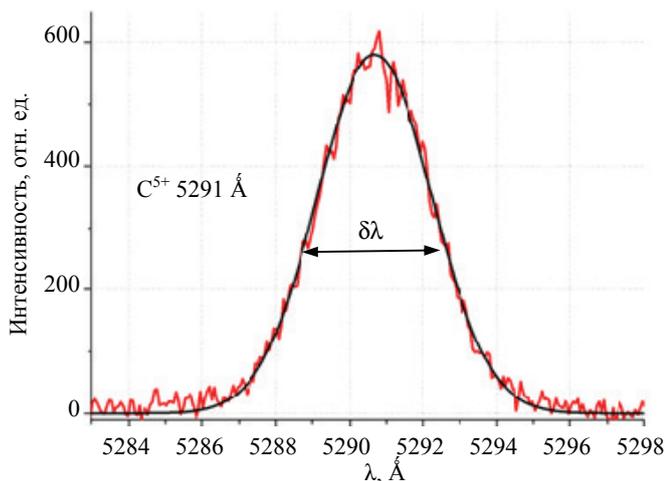


Рис. 5. Спектр CXRS-линии углерода C^{5+} 5291 Å

также учесть все остальные механизмы уширения в эксперименте. В условиях токамака свой вклад в уширение вносят эффекты Штарка, Зеемана и тонкая структура спектральной линии. Окончательное уширение линии формируется в процессе свёртки спектрального контура линии с аппаратной функцией системы регистрации.

На рис. 6, а показаны инструментальный контур спектрометра HES3 на длине волны 5291 Å с полушириной $\sim 0,15\text{--}0,2$ Å и его аппаратная функция с полушириной $\sim 1,5$ Å, используемая в CXRS-измерениях концентрации ядер углерода. Для упрощения операции свёртки аппаратной функции со спектральными профилями отдельных компонентов CXRS-линий форму аппаратной функции удобно представить в виде суммы гауссовских контуров. Так, пунктиром на рис. 6, а показан набор из пяти гауссов, которыми аппроксимируется аппаратная функция, используемая при измерении спектра линии 5291 Å.

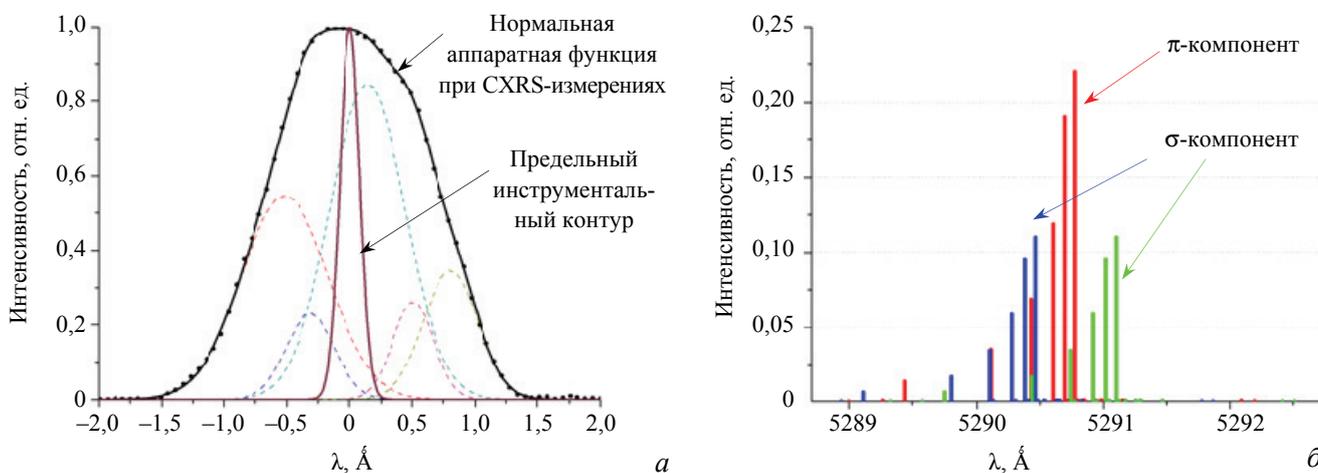


Рис. 6. Аппаратная функция и инструментальный контур спектрометра HES3 (а) и комбинация расщепления тонкой структуры и зеемановского расщепления линии 5291 Å иона C^{5+} в условиях Т-10 (б) (красным, синим и зелёным цветом указаны компоненты тонкой структуры линии 5291 Å с квантовыми числами $m = 0, +1$ и -1 соответственно)

Учёт влияния эффекта Зеемана и тонкой структуры перехода может быть осуществлён с помощью двух методов:

— задание простой параметрической аппроксимации вклада тонкой структуры и эффекта Зеемана в расщепление линии в соответствии с материалами [5], после чего спектральные профили каждого набора из трёх компонентов уширяются аппаратной функцией и все свертки суммируются;

— полный учёт тонкой структуры линии C^{5+} из базы данных ADAS [6] и учёт зеемановского расщепления. Поскольку в нашем случае наблюдение ведётся перпендикулярно продольному магнитному полю, то для отношения зеемановских компонентов π и σ имеем $I_\pi = 2I_\sigma$ (соответствующий пример пока-

ции видимой области спектра. Наиболее часто для этих целей применяется линия 5291 Å иона C^{5+} . На рис. 5 показан спектральный контур данной линии с полушириной $\delta\lambda$, измеренный в разряде Т-10.

В случае доплеровского уширения спектральной линии иона (атома) с атомным весом A_i полуширина линии $\delta\lambda_{\text{Dop}}$ связана с локальной величиной ионной температуры плазмы T_i соотношением

$$T_i = 1,7 \cdot 10^8 A_i \left(\frac{\delta\lambda_{\text{Dop}}}{\lambda} \right)^2. \quad (1)$$

Для определения температуры из доплеровского уширения спектральной линии необходимо

также учесть все остальные механизмы уширения в эксперименте. В условиях токамака свой вклад в уширение вносят эффекты Штарка, Зеемана и тонкая структура спектральной линии. Окончательное уширение линии формируется в процессе свёртки спектрального контура линии с аппаратной функцией системы регистрации.

также учесть все остальные механизмы уширения в эксперименте. В условиях токамака свой вклад в уширение вносят эффекты Штарка, Зеемана и тонкая структура спектральной линии. Окончательное уширение линии формируется в процессе свёртки спектрального контура линии с аппаратной функцией системы регистрации.

На рис. 6, а показаны инструментальный контур спектрометра HES3 на длине волны 5291 Å с полушириной $\sim 0,15\text{--}0,2$ Å и его аппаратная функция с полушириной $\sim 1,5$ Å, используемая в CXRS-измерениях концентрации ядер углерода. Для упрощения операции свёртки аппаратной функции со спектральными профилями отдельных компонентов CXRS-линий форму аппаратной функции удобно представить в виде суммы гауссовских контуров. Так, пунктиром на рис. 6, а показан набор из пяти гауссов, которыми аппроксимируется аппаратная функция, используемая при измерении спектра линии 5291 Å.

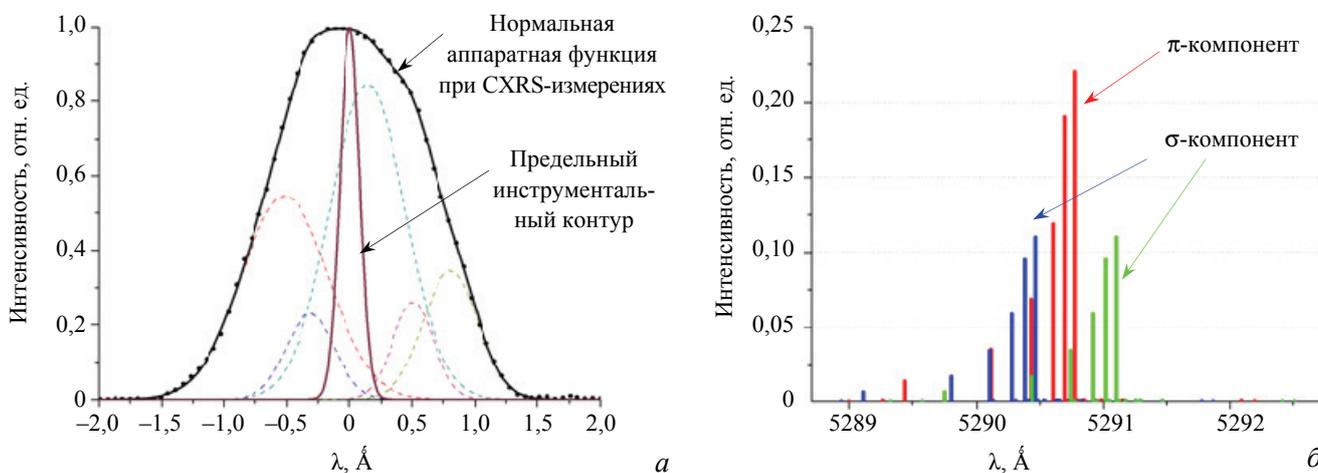


Рис. 6. Аппаратная функция и инструментальный контур спектрометра HES3 (а) и комбинация расщепления тонкой структуры и зеемановского расщепления линии 5291 Å иона C^{5+} в условиях Т-10 (б) (красным, синим и зелёным цветом указаны компоненты тонкой структуры линии 5291 Å с квантовыми числами $m = 0, +1$ и -1 соответственно)

Учёт влияния эффекта Зеемана и тонкой структуры перехода может быть осуществлён с помощью двух методов:

— задание простой параметрической аппроксимации вклада тонкой структуры и эффекта Зеемана в расщепление линии в соответствии с материалами [5], после чего спектральные профили каждого набора из трёх компонентов уширяются аппаратной функцией и все свертки суммируются;

— полный учёт тонкой структуры линии C^{5+} из базы данных ADAS [6] и учёт зеемановского расщепления. Поскольку в нашем случае наблюдение ведётся перпендикулярно продольному магнитному полю, то для отношения зеемановских компонентов π и σ имеем $I_\pi = 2I_\sigma$ (соответствующий пример пока-

зан на рис. 6, б). Спектральные контуры полученных компонентов уширяются аппаратной функцией, и все свёртки суммируются.

Оба метода дают в итоге результаты, практически совпадающие друг с другом во всём диапазоне измеряемых температур, однако второй способ следует считать более надёжным, несмотря на то, что на обработку данных затрачивается несколько больше времени.

На рис. 7 для примера показаны профили ионной температуры, измеренные из уширения CXRS-линии 5291 \AA иона C^{5+} в омических разрядах Т-10, различающихся по величине электронной плотности.

Следует отметить, что при отработке методики CXRS-измерений ионной температуры применение составного спектрометра HES13 предоставляет ряд существенных преимуществ. В частности, спектрометр HES13 обеспечивает проведение измерения профилей температуры $T_i(r)$ одновременно по двум CXRS-линиям: линии D_α атомов рабочего газа и линии иона C^{5+} собственной примеси. Это позволяет детально исследовать влияние эффекта гало на форму профилей $T_i(r)$, получаемых из уширения CXRS-линии D_α рабочего газа, особо учитывая тот факт, что в условиях Т-10 присутствие атомов гало не влияет на измерение $T_i(r)$ из уширения CXRS-линий примесей [7]. Таким образом, наличие измеренного по CXRS-линии иона C^{5+} (или He^{1+} и др.) неискажённого эффектом гало профиля $T_i(r)$ наряду с одновременно получаемым по линии D_α искажённым профилем $T_i(r)$, обеспечивает необходимый набор данных для построения 3D-модели гало, описывающей влияние эффекта на форму измеряемых профилей $T_i(r)$.

Помимо преимуществ в исследовании влияния эффекта гало на результаты измерений профилей $T_i(r)$, составной спектрометр HES13 может быть эффективно задействован в задаче сравнения температур ядер примесей различных сортов. Проведение такого сравнения оправдано в условиях установки Т-10 с невысокой ионной температурой $\leq 1 \text{ кэВ}$, при которой эффект гало не влияет на измерение $T_i(r)$ по CXRS-линиям примесей [7]. При этом следует ожидать, что профили температур всех ядер окажутся одинаковыми из-за малости времени выравнивания температур ($< 1 \text{ мс}$) между различными сортами ионов в плазме Т-10. Совпадение профилей температур должно свидетельствовать как о правильности выполнения CXRS-измерений, так и о справедливости используемых методов обработки результатов.

Результаты сравнения температурных профилей $T_i(r)$, полученных с помощью модернизированной CXRS-схемы как из уширения CXRS-линий различных Н-подобных ионов примесей, так и из уширения CXRS-линии D_α , будут представлены с соответствующим обсуждением в отдельной статье.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЯДЕР ПРИМЕСЕЙ

Существующая в настоящее время на Т-10 схема CXRS-измерений создавалась в основном для того, чтобы отработать методику измерений концентрации ядер примесей и получить инструмент для исследования переноса частиц в плазме токамака.

В отличие от определения ионной температуры, которое требует высокой статистики измерения доплеровских контуров и вынуждает прибегать к суммированию спектральных контуров CXRS-линий от нескольких импульсов инжектора на стационарной стадии разряда, измерение концентрации ядер не требует столь высокого набора статистики, поскольку информация о концентрации заложена в интегральной интенсивности линии, а не в форме её спектрального контура. Другой особенностью измерения концентрации ядер является требование одновременного измерения CXRS-линии и линии H_α пучка строго в одних и тех же зонах плазмы.

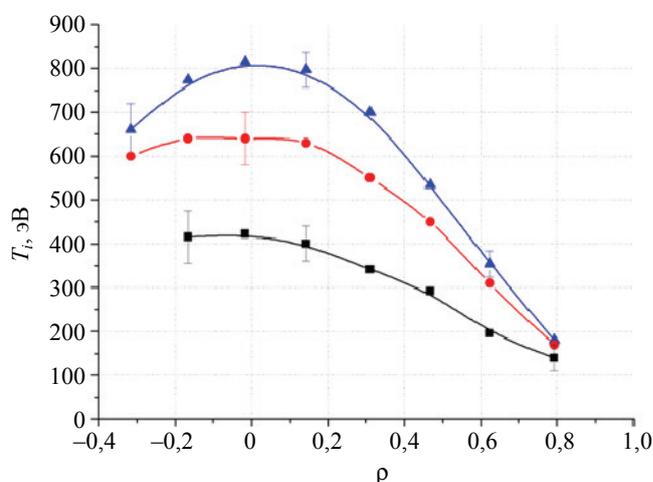


Рис. 7. Профили ионной температуры в омических разрядах с током $I_p = 220 \text{ кА}$ ($B_t = 2,3 \text{ Тл}$, $q(a_L) = 3,3$) и различными величинами электронной плотности: $\bar{n}_e = 3 \cdot 10^{19}$ (▲), $1,7 \cdot 10^{19}$ (●), $1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (■)

Несомненное достоинство схемы измерений с прозрачной решёткой в составном спектрометре NES13 (или аналогичной схемы, например [9]) состоит в том, что в ней реализована возможность использовать для измерений спектров CXRS-линии и линии H_α атомов пучка исходный свет, поступающий из одной и той же зоны в плазме и проходящий через одни и те же элементы системы сбора и передачи света. В этом случае ни неоднородности свечения внутри объёма диагностического пучка, ни какие-либо дефекты системы передачи света не влияют на измерения концентрации ядер примесей.

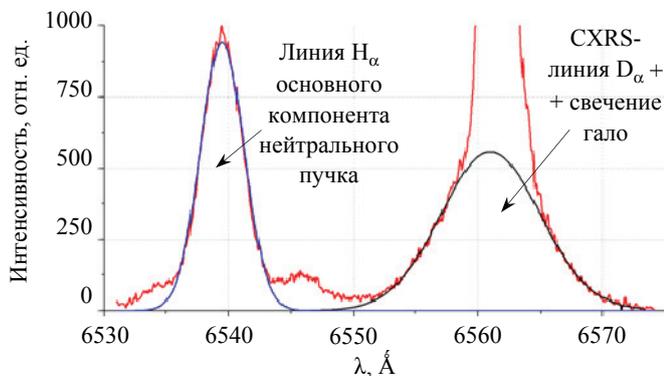


Рис. 8. Спектр в районе CXRS-линии дейтерия D_α 6561 Å вместе со спектром линий H_α водородного пучка

На рис. 8 показан спектр CXRS-линии D_α 6561 Å атомов рабочего газа дейтерия, а также спектр линий атомов H_α пучка, сдвинутый за счёт эффекта Доплера в синюю область, поскольку наблюдение ведётся навстречу пучку под углом $\sim 60^\circ$ к его оси.

Из спектра линии H_α хорошо видно, что в энергетическом спектре пучка доминирует основной компонент $E_0 = 30$ кэВ, при этом линия H_α слабо поляризована, поскольку наблюдение ведётся под малым углом $\sim 30^\circ$ к вектору лоренцовского поля пучка.

Для интенсивности CXRS-линии примесей

можно записать выражение

$$I_{Z \text{ CXRS}} = \sum_i n_{\text{Beam}_i} n_Z Q_{Z \text{ CXRS}_i}, \quad (2)$$

где n_{Beam_i} — концентрация атомов соответствующих компонентов пучка; n_Z — концентрация ядер соответствующей примеси; $Q_{Z \text{ CXRS}_i}$ — скоростной коэффициент возбуждения CXRS-линий ядер примеси атомами i -го компонента пучка.

Интенсивность $I_{H_\alpha \text{ Beam}_i}$ одного из компонентов линии H_α пучка, связанных с соответствующими энергетическими компонентами пучка, можно представить в виде

$$I_{H_\alpha \text{ Beam}_i} = n_{\text{Beam}_i} n_e Q_{H_\alpha \text{ Beam}_i}, \quad (3)$$

где n_e — концентрация электронов; $Q_{H_\alpha \text{ Beam}_i}$ — скоростной коэффициент возбуждения электронами атомов пучка, принадлежащих данному энергетическому компоненту.

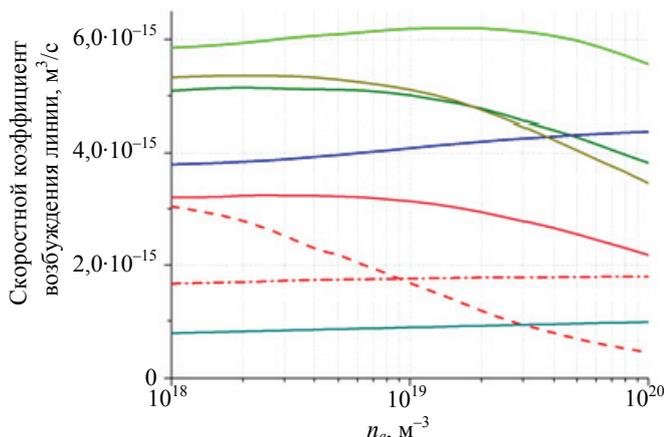


Рис. 9. Величины скоростных коэффициентов возбуждения CXRS-линий водородоподобных ионов и линии H_α пучка в зависимости от плотности плазмы: H_α нейтрального пучка (---); D_α 6561 Å ($n = 3-2$) (-.-.-); He^{1+} 4687 Å ($n = 4-3$) (—); Li^{2+} 5167 Å ($n = 7-5$) (—); C^{5+} 5291 Å ($n = 8-7$) (—); N^{6+} 5669 Å ($n = 9-8$) (—); O^{7+} 6068 Å ($n = 10-9$) (—); Ne^{9+} 5249 Å ($n = 11-10$) (—)

Из (2) и (3) можно получить следующее выражение для определения концентрации ядер:

$$n_Z = n_e \frac{I_{Z \text{ CXRS}}}{\sum_i I_{H_\alpha \text{ Beam}_i} \frac{Q_{H_\alpha \text{ Beam}_i}}{Q_{Z \text{ CXRS}_i}}}. \quad (4)$$

Видно, что в выражении (4) отсутствует концентрация атомов пучка. Таким образом, для измерения концентрации ядер примесей достаточно измерить отношение интенсивности соответствующих линий и знать скоростные коэффициенты их возбуждения.

При CXRS-измерениях на Т-10 используются расчётные скоростные коэффициенты возбуждения CXRS-линий Н-подобных ионов, взятые из базы атомных данных ADAS [6]. На рис. 9 показаны зависимости соответствующих значений $Q_{Z \text{ CXRS}}$ от плотности плазмы n_e для энергии атомов пучка $E_0 = 30$ кэВ, $T_e = T_i = 1$ кэВ, $Z_{\text{эф}} = 3$.

Было бы очень удобно аналогично примесям напрямую измерять концентрацию дейтонов плазмы, используя для этого CXRS-линию D_α , однако, как было указано, интенсивность и спектр линии D_α могут быть существенно искажены влиянием эффекта гало. В результате интенсивность CXRS-линии дейтерия приобретает вид

$$I_{D_\alpha \text{ CXRS}} = \sum_i n_{\text{Beam}_i} n_{D^+} Q_{D_\alpha \text{ CXRS}_i} + I_{\text{Halo}}, \quad (5)$$

где n_{D^+} — концентрация дейтонов плазмы; $Q_{D_\alpha \text{ CXRS}_i}$ — скоростной коэффициент возбуждения CXRS-линии D_α ; I_{Halo} — вклад в интенсивность линии D_α от эффекта гало.

При формировании новой схемы измерения концентрации имелся выбор, в каком качестве задействовать оба спектрометра: составной HES13 и независимый HES2, с отдельной системой сбора света. Действительно, первый канал спектрометра HES13 с прозрачной решёткой был способен измерять только спектр в районе линии 5291 \AA , при этом второй канал спектрометра HES13 исходно планировалось использовать для измерения концентрации быстрых атомов пучка. Однако эксперименты показали, что профили свечения линии H_α атомов пучка, измеренные вторым каналом спектрометра HES13 и отдельным спектрометром HES2, с высокой точностью совпадают. Это позволило при проведении экспериментов по измерению концентрации освободить второй канал спектрометра HES13 для измерения CXRS-линии иона кислорода O^{7+} (в дальнейшем — линий ионов He^{1+} , Li^{2+} , N^{6+} , Ne^{9+}), а за спектрометром HES2 оставить измерение профиля концентрации атомов пучка.

Для определения профилей концентрации ядер проводилась относительная калибровка каналов спектрометров «по пучку в газе», при которой в каждом канале регистрации измеряется относительная интенсивность свечения линий H_α пучка, возникающая при прохождении пучка через напущенный в камеру T-10 водород с постоянным давлением $\sim 10^{-4}$ торр.

Таким способом были относительно прокалиброваны обе схемы CXRS-измерений, собранные на спектрометрах HES2 и HES13. При подобной калибровке in-situ автоматически учитываются все геометрические факторы взаимного расположения систем сбора света, а также оптическое пропускание обеих систем сбора.

Была проведена абсолютная спектральная калибровка составного спектрометра HES13 во всех его рабочих спектральных диапазонах с использованием абсолютно калиброванных банд-ламп и однородного источника LabSphere USS-600C. Результаты относительной и абсолютной калибровок приведены на рис. 10.

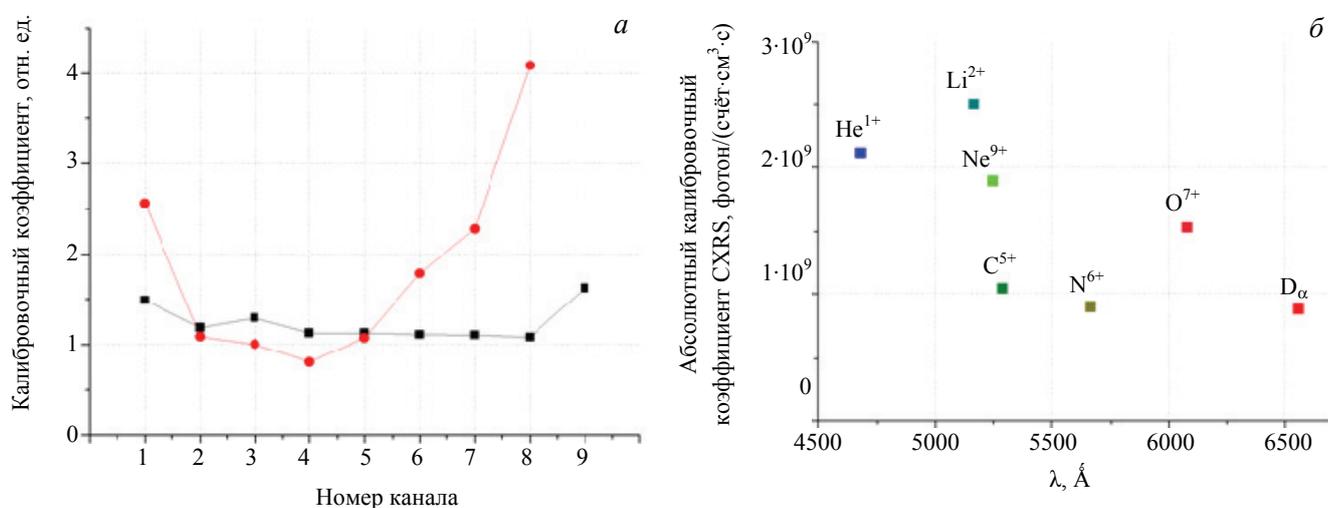


Рис. 10. Относительная калибровка каналов спектрометров HES1 (■), HES2 (●) (a) и абсолютная спектральная калибровка HES13 (б)

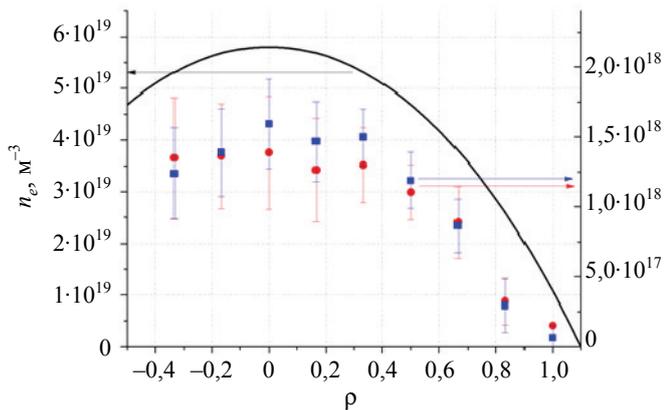


Рис. 11. Профили концентраций ядер углерода и кислорода, одновременно измеренные в омическом разряде с током $I_p = 300$ кА ($B_t = 2,3$ Тл, $q(a_L) = 2,3$): — — плотность электронов n_e ; ● — концентрация ядер углерода n_C ; ■ — концентрация ядер кислорода n_O

девяти хордам наблюдения, в районе CXRS-линии 5291 Å. Полученные в результате CXRS-измерений величины и профили концентрации ядер С и О хорошо согласуются с значениями $Z_{эф}(r)$, полученными из профилей интенсивности тормозного континуума.

Первые результаты измерений ионной температуры и концентрации ядер примесей с использованием модернизированной схемы CXRS-измерений были использованы при анализе геодезических акустических мод [10]. Эти результаты будут опубликованы в ближайшее время.

Полученные экспериментальные данные о поведении ядер лёгких примесей в плазме представляют самостоятельный интерес и будут публиковаться в виде отдельных статей.

ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЛАНЫ

На следующем этапе модернизации планируется использовать в схеме CXRS-диагностики Т-10 усиленный прототип CXRS-спектрометра ИТЭР с тремя прозрачными голографическими решётками на линии 5291 Å иона C^{5+} , линию 4686 Å иона He^{1+} и линию H_α атомов пучка. Спектрометр, изготавливаемый для токамаков Т-10 и Т-15, имеет относительно варианта ИТЭР сразу три щели на входе, существенно

На рис. 11 представлены результаты одновременных измерений профилей концентрации ядер кислорода и углерода в омическом разряде с током 300 кА. Данный рисунок демонстрирует тот факт, что в омических разрядах с высоким током плазмы профили эффективного ионного заряда $Z_{эф}(r)$, оцененные из CXRS-измерений, оказываются достаточно однородными в сечении шнура: $Z_{эф} = 1 + \sum_i n_i Z_i^2 / n_e$. Сумма берётся по всем ионам присутствующих в плазме сортов примесей.

Отметим, что абсолютная калибровка спектрометра HES13 в области 5291 Å позволила задействовать для получения профилей $Z_{эф}(r)$ распределения интенсивности тормозного континуума, измеряемые спектрометром одновременно по

большой апертурный угол (1/2,3) и содержит на выходе дополнительный спектрометр HES. Излучение, прошедшее через прозрачные решётки основного спектрометра, получает возможность дифрагировать на отражающей решётке Эшелле 200 штр./мм выходного спектрометра HES, обеспечивая дополнительное измерение CXRS-линии выбранной примеси: Li, N, O, Ne. Для регистрации CXRS-спектров, помимо указанных камер EMCCD PhotonMax 512B, задействованы две камеры CCD Pixis 1300B с размером пикселя 20×20 мкм и матрицы 1320×1300 пикселей. Макетное изображение нового спектрометра показано на рис. 12.



Рис. 12. Прототип спектрометра для CXRS диагностики Т-15

Запланирована также модернизация диагностического инжектора Т-10, включающая увеличение энергии пучка (с 30 до 40 кэВ), тока атомов (с 10 до 20 mA/cm^2) и длительности импульса инжектора (с 1 до 20 мс).

Успешное выполнение следующего этапа модернизации позволит резко повысить точность и надёжность CXRS-измерений профилей $T_i(r)$, $n_z(r)$ и даст возможность приступить к измерениям на Т-10 профилей скорости полоидального вращения шнура $V_p(r)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На токамаке Т-10 проведена модернизация CXRS-диагностики профилей ионной температуры и концентрации ядер примесей. Успешно применена методика одновременного измерения CXRS-спектров двух примесей и спектра линии H_{α} пучка.

При измерениях в стационарной стадии разряда точность измерения профиля ионной температуры в пределах $-0,3a_L - a_L$ составляет 5—10%.

Отработана методика одновременного измерения профилей концентрации двух примесей плазмы. Помимо концентрации ядер собственных примесей плазмы — углерода и кислорода, возможно проведение одновременных измерений профилей концентрации ядер углерода и одной из инжектированных примесей: He, Li, N, Ne.

Точность определения профиля концентрации ядер достаточна для проведения исследований временной динамики профилей концентрации как собственных, так и инжектированных в плазму примесей, что необходимо для исследования физики процессов переноса в ионном компоненте плазмы.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупин В.А. и др. — Физика плазмы, 2013, т. 39, № 8, с. 712.
2. Melnikov A.V. et al. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2006, vol. 48, S87.
3. Ephrem Geert Delabie. Neutral beam driven hydrogen spectroscopy in fusion plasmas. 2011.
4. Давыденко В.И. и др. — Препринт ИАЭ. Москва. 2004.
5. Blom A., Jupen C. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2002, vol. 44, p. 1229.
6. The Atomic Data and Analysis Structure (ADAS). <http://www.adas.ac.uk/>.
7. Klyuchnikov L.A. et al. — In: 39th EPS Conf. & 16th Intern. Congress on Plasma Physics, 2012, P1.090.
8. Dux R. et al. — Ibid., P2.049.
9. Bepamyatnov I.O. et al. — Review of Scientific Instruments, 2010, vol. 81, p. 10D709.
10. Melnikov A.V. et al. — Письма в ЖЭТФ, 2014 (в печати).



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



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



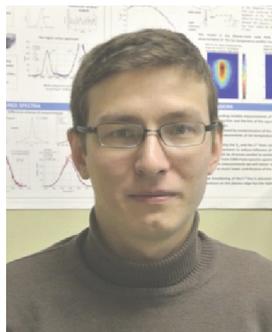
Николай Николаевич Науменко, с.н.с., лауреат Государственной премии, лауреат премии Ленинского комсомола в области науки и техники; Институт физики НАН, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости 68



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



Алексей Викторович Горбунов, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



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



Владислав Игоревич Тройнов, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Фёдор Витальевич Фомин, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия

Статья поступила в редакцию 13 октября 2014 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 4, с. 60—70.