

УДК 533.9.08

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО АЛМАЗНОГО СПЕКТРОМЕТРА БЫСТРЫХ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ НА ТОКАМАКЕ JET

*В.А. Красильников¹, В.Н. Амосов¹, И. Коффей², С. Поповичев², Ю.А. Кацук¹, Д.А. Скопинцев¹,
С.А. Мещанинов¹, Г.Е. Немцев¹*

¹ Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Москва, Россия

² Culham Science Centre, Abingdon, UK

В настоящей статье описываются результаты применения созданной авторами методики для спектрометрии атомов перезарядки токамака JET при различных сценариях дополнительного нагрева плазмы. По данным алмазного спектрометра наблюдаются развитие пилообразных и ELM-неустойчивостей, переход плазмы из H- в L-режим, худшее проникновение ВЧ-волн ИЦР-нагрева в H-режиме, демонстрируется влияние плотности плазмы на время торможения быстрых ионов. Помимо этого, продемонстрирован более эффективный нагрев быстрого ионного компонента плазмы при более высокой мощности ИЦР-нагрева.

Ключевые слова: спектрометрия атомов перезарядки, алмазный детектор, плазма, быстрые ионы, токамак, JET.

APPLICATION OF DIGITAL DIAMOND FAST CHARGE-EXCHANGE ATOMS SPECTROMETER AT JET TOKAMAK

*V.A. Krasilnikov¹, V.N. Amosov¹, I. Coffey², S. Popovichev², Yu.A. Kashchuk¹, D.A. Skopintsev¹,
S.A. Meshchaninov¹, G.E. Nemtsev¹*

¹ State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for innovation & fusion research, Troitsk, Moscow, Russia

² Culham Science Centre, Abingdon, UK.

This paper describes the results of the application of diamond detector based charge-exchange atom spectrometer developed by the authors at JET tokamak during experiments with different scenarios of additional heating of the plasma. According to diamond spectrometer data the development of sawtooth and ELM-instabilities are demonstrated, plasma transition from H- to L-mode is observed, low efficiency of ICRF heating waves penetration in H-mode is confirmed, the effect of the plasma density on the slowing down of fast ions is demonstrated. In addition, more efficient heating of fast ion component of the plasma due to higher power of ICRF heating is demonstrated.

Keywords: charge-exchange atom spectroscopy, diamond detector, plasma, fast ions, tokamak, JET.

Для исследования энергетических спектров быстрых ионов при различных сценариях нагрева плазмы токамака JET был установлен компактный быстродействующий спектрометр атомов перезарядки с детектором на базе природного алмаза (алмазный спектрометр, АС) [1]. Данная система дополняет комплекс многоканального анализатора нейтральных частиц (АНЧ) [2].

Вертикальный и горизонтальный анализаторы нейтральных частиц, установленные на токамаке JET, позволяют анализировать энергетические распределения ионов плазмы токамака, разделяют частицы по массе и заряду. Применение этих анализаторов для исследования функции распределения имеет некоторые ограничения: фиксированное число каналов, низкая эффективность регистрации, особенности геометрии измерений. Конусы регистрации АНЧ направлены строго перпендикулярно плазменному шнуру. В дополнение к этим диагностикам на токамаке JET установлен спектрометр быстрых атомов перезарядки с детектором на базе природного алмаза с цифровой обработкой сигналов. Алмазный детектор обладает высокой эффективностью регистрации атомов перезарядки (100%) в широком диапазоне энергий частиц (50 кэВ—8 МэВ, для H⁰). Направление оси конуса регистрации алмазного спектрометра позволяет измерять энергетические распределения быстрых атомов перезарядки, имеющих в момент перезарядки параллельный магнитному полю компонент скорости, составляющий 6—8% от полной скорости частицы. Алмазный спектрометр применялся при исследованиях эффективности различных видов дополнительного нагрева плазмы и удержания быстрых ионов [3—5].

РАСПОЛОЖЕНИЕ АЛМАЗНОГО СПЕКТРОМЕТРА БЫСТРЫХ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ НА ТОКАМАКЕ JET

Алмазный детектор установлен в вакуумной камере в конце 18-метрового вакуумного канала, сообщающегося с вакуумной камерой токамака JET через экваториальный диагностический порт в октанте 6

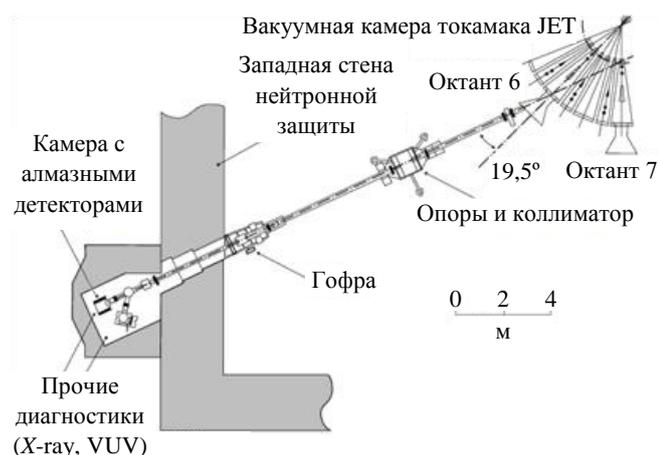


Рис. 1. Расположение алмазных детекторов спектрометра быстрых атомов перезарядки на токамаке JET

предусилителя параллельно с входом быстрого АЦП поступал на усилитель-формирователь Canberra 2024 аналогового канала регистрации. Выходной сигнал формирующего усилителя подавался на штатный спектрометрический АЦП установки JET CAD-9 ADC [6]. Однако испытания спектрометра в приведённой схеме (со стандартными предусилителями) на установке JET показали, что уровень электромагнитных помех не позволяет измерять спектры быстрых атомов перезарядки в энергетическом диапазоне 0,1—1 МэВ. Эквивалентный уровень шумов спектрометра при работе силовых систем инжекторов нейтральных атомов установки JET превышал 200 кэВ. Более того, в случае использования стандартных предусилителей необходимо использовать несколько кабелей, создающих протяжённую антенну. Для снижения уровня электромагнитных наводок разработан новый специализированный спектрометрический тракт, обладающий повышенной помехозащищённостью. В новой схеме используется только один коаксиальный кабель, по которому подаётся питание предусилителя, напряжение смещения детектора и передаётся сигнал от предусилителя к блоку обеспечения и далее к АЦП.

На токамаке JET в экспериментах используются два инжектора нейтральных частиц, расположенные в четвёртом и восьмом октантах (рис. 2). Каждый из них имеет по два направления инжекции — нормальное и тангенциальное. Нормальный луч инжектора направлен к оси плазмы под большим углом (75° против 55° у тангенциального) и, пройдя плазму, попадает на внутреннюю стенку вакуумной камеры токамака, тогда как тангенциальный луч выходит на противоположную наружную стенку камеры. Максимальная энергия инжектируемых частиц составляет 130 кэВ, максимальная суммарная мощность инжекции до 25 МВт при времени инжекции до 15 с. Как показано на рис. 2, конус регистрации алмазного спектрометра пересекает тангенциальный луч инжектора октанта 8.

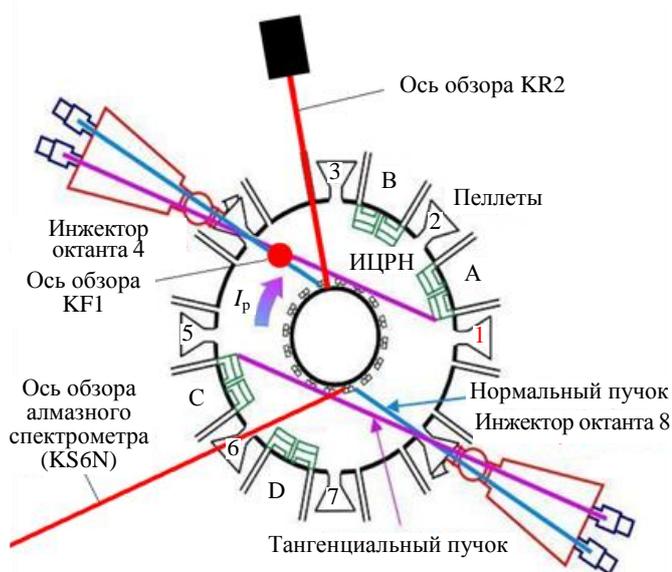


Рис. 2. Расположение диагностик потоков нейтральных частиц и устройств дополнительного нагрева плазмы токамака JET. Показаны лучи нейтральной инжекции (НИ), расположение антенн ИЦРН, а также лучи обзоров алмазного спектрометра (KS6N) и двух анализаторов нейтралов (вертикальный KF1 и горизонтальный KR2)

(рис. 1). Расстояние от детектора до центра плазмы составляет 2010 см. Ось конуса регистрации детектора составляет с нормалью к вектору магнитного поля в центре плазмы угол 21°. Телесный угол регистрации равен $1,75 \cdot 10^{-4}$ стерадиан. Предварительные усилители расположены снаружи вакуумной камеры. Быстрый 14-разрядный АЦП с частотой дискретизации 100 МГц установлен в промышленном компьютере, находящемся в диагностическом холле. Сигнал передаётся от блока обеспечения к АЦП по радиочастотному кабелю длиной 100 м.

В первых экспериментах в спектрометре использовались спектрометрические предусилители Ortec 142A, Ortec 142AH, Canberra 2004. Сигнал

предусилителя параллельно с входом быстрого АЦП поступал на усилитель-формирователь Canberra 2024 аналогового канала регистрации. Выходной сигнал формирующего усилителя подавался на штатный спектрометрический АЦП установки JET CAD-9 ADC [6]. Однако испытания спектрометра в приведённой схеме (со стандартными предусилителями) на установке JET показали, что уровень электромагнитных помех не позволяет измерять спектры быстрых атомов перезарядки в энергетическом диапазоне 0,1—1 МэВ. Эквивалентный уровень шумов спектрометра при работе силовых систем инжекторов нейтральных атомов установки JET превышал 200 кэВ. Более того, в случае использования стандартных предусилителей необходимо использовать несколько кабелей, создающих протяжённую антенну. Для снижения уровня электромагнитных наводок разработан новый специализированный спектрометрический тракт, обладающий повышенной помехозащищённостью. В новой схеме используется только один коаксиальный кабель, по которому подаётся питание предусилителя, напряжение смещения детектора и передаётся сигнал от предусилителя к блоку обеспечения и далее к АЦП.

На токамаке JET в экспериментах используются два инжектора нейтральных частиц, расположенные в четвёртом и восьмом октантах (рис. 2). Каждый из них имеет по два направления инжекции — нормальное и тангенциальное. Нормальный луч инжектора направлен к оси плазмы под большим углом (75° против 55° у тангенциального) и, пройдя плазму, попадает на внутреннюю стенку вакуумной камеры токамака, тогда как тангенциальный луч выходит на противоположную наружную стенку камеры. Максимальная энергия инжектируемых частиц составляет 130 кэВ, максимальная суммарная мощность инжекции до 25 МВт при времени инжекции до 15 с. Как показано на рис. 2, конус регистрации алмазного спектрометра пересекает тангенциальный луч инжектора октанта 8. Вертикальный анализатор нейтральных частиц «видит» оба луча, а горизонтальный — только тангенциальный луч инжектора октанта 4.

Оба анализатора нейтралов регистрируют атомы перезарядки с питч-углами (угол между вектором скорости частицы и линией тороидального магнитного поля) в узком диапазоне вблизи перпендикуляра — $90 \pm 3^\circ$. Такие частицы принадлежат к одному из классов запертых частиц. В отличие от анализаторов алмазный спектрометр

может регистрировать частицы, значения питч-углов которых находятся в диапазоне от 68° (в центре плазмы) до 70° (на периферии).

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ НА УДЕРЖАНИЕ БЫСТРЫХ ЧАСТИЦ ТОКАМАКА JET

С помощью АС в нескольких разрядах токамака JET получены данные, позволяющие проанализировать влияние ионной температуры и плотности плазмы на скорость торможения частиц и их энергетическое распределение. Рассмотрим три разряда токамака JET: № 79 199, 79 202, 79 203. Эксперимент, в рамках которого проведены эти разряды, ставил целью изучение удержания плазмы ^4He при переходах плазмы из L- в H-режим [4]. С помощью АС были зарегистрированы энергетические спектры атомов перезарядки водорода в режимах работы токамака при ионно-циклотронном нагреве (ИЦН) плазмы после инъекции нейтралов.

При основном компоненте плазмы ^4He , нейтральной инъекции ^4He и малой добавке H дополнительный ВЧ-нагрев плазмы был настроен таким образом, что находящийся в центре плазмы ионно-циклотронный резонанс соответствовал первой гармонике водорода (32,50 МГц/1,8 МА/2 Тл, фундаментальный резонанс H на 2,87 м). Временные диаграммы дополнительного нагрева, а также диаграммы скорости счёта алмазного спектрометра показаны на рис. 3.

Во временном интервале с 61-й по 65-ю с разряда JET № 79 199 зарегистрированы потоки высокоэнергетичных атомов водорода, ускоренных до перезарядки ионно-циклотронным нагревом. Скорость счёта алмазного спектрометра в рассматриваемых разрядах не коррелирует ни с интенсивностью счёта нейтронных диагностик, ни с интенсивностью счёта гамма-диагностик, следовательно, счёт алмазного спектрометра не обусловлен нейтронным и гамма-потоком. Кроме того, если предположить, что регистрируемые частицы являются атомами ^4He , ускоренными ИЦР-нагревом на второй гармонике, то пик счёта должен был бы наблюдаться во время одновременной работы нейтральной инъекции и ИЦР-нагрева. Более того, в разряде 79 203 во время работы ИЦР-нагрева мощность нейтральной инъекции в течение секунды была в 5 раз меньше, чем в разрядах 79 199 и 79 202, и в таком случае в этом разряде должен наблюдаться меньший счёт (см. рис. 3). Однако наблюдаются прямо противоположные явления, опровергающие это предположение.

Помимо счёта единичных событий, наблюдаемых одновременно с мощными пилообразными колебаниями (63—65 с), в этих разрядах регистрировались и многократно наложившиеся импульсы, всплески которых коррелируют с неустойчивостью на границе плазмы — ELM (наблюдаемые до 60,5 с, см. рис. 4). Эволюция этой неустойчивости провоцирует всплески H-альфа-излучения. Одновременно с развитием ELM-неустойчивости в центре плазмы происходят пилообразные колебания. При подробном

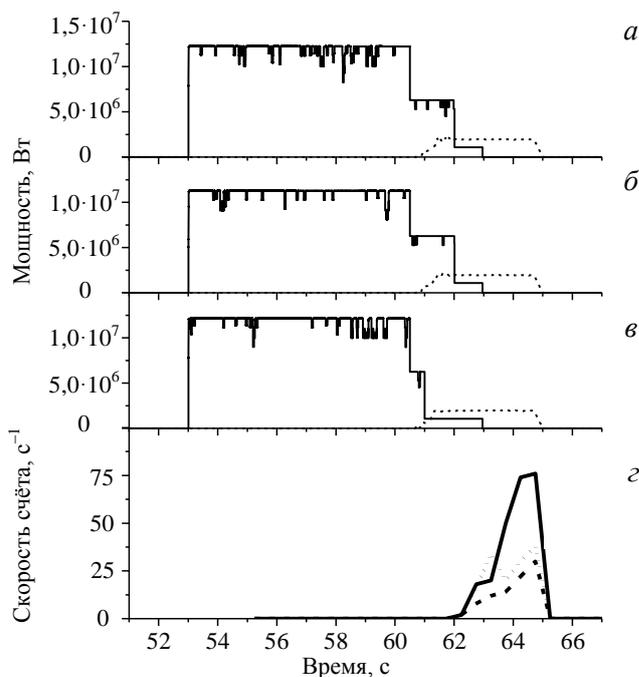


Рис. 3. Временные диаграммы мощности дополнительного нагрева (инъекции нейтралов — —, ИЦН — - -) (а, б, в) для разрядов 79 199, 79 202, 79 203, а также скорость счёта алмазного спектрометра для этих разрядов: ··· — 79 199; - - - — 79 203 (z)

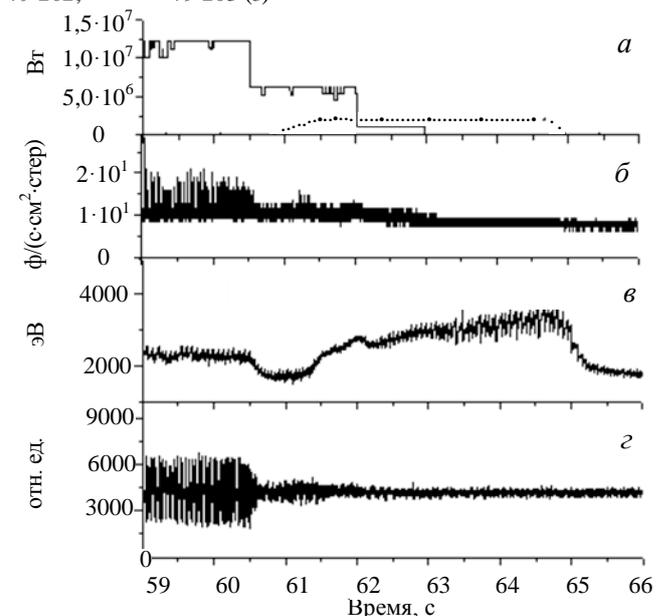


Рис. 3. Разряд JET 79 199. Временные диаграммы мощности дополнительного нагрева (— — НИ; ··· — ИЦРН) (а), нормализованный поток H_α -излучения (б), электронная температура в центре плазменного шнура (в), сигнал алмазного спектрометра (z)

рассмотрении не наблюдалась корреляция пилообразных колебаний с сигналом алмазного спектрометра. Поток низкоэнергетичных атомов в месте расположения алмазных детекторов при развитии ELM-неустойчивости достигают $10^{10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, а их характерная энергия не превышает 1 эВ [4]. В результате невозможно различить отдельные импульсы, а их многократное наложение представляет собой относительно медленный положительный импульс, который система обратной связи предусилителя пытается скомпенсировать, в результате чего появляется отрицательный выброс сразу после положительного.

В упомянутых разрядах 79 199, 79 202 и 79 203 под действием пучка нейтральной инжекции плазма переходит в режим улучшенного удержания — H-моды и находится в нём до 61-й с. Развитие ELM-неустойчивостей на периферии плазмы, находящейся в H-моды, приводит к резкому снижению связи антенн с плазмой, что препятствует проникновению ВЧ-волн от антенн в плазму. Лишь после отключения НИ и перехода плазмы в L-моду центральные области плазмы начинают поглощать мощность ИЦН, что приводит к образованию частиц водорода с энергией более 100 кэВ, регистрируемых АС.

Высокоэнергетичные спектры атомов водорода, зарегистрированные во время трёх разрядов со схожими сценариями дополнительного нагрева, показаны на рис. 5. В разряде 79 203 плотность плазмы на 63—65-й с разряда составляла в среднем $1,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, тогда как для разрядов 79 199 и 79 202 это значение составляло в среднем $2,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Вследствие этого время торможения ионов в разряде 79 203 составило 0,75 с против 0,4 с в разрядах 79 199 и 79 202. В результате более длительного торможения частиц повышается вероятность их перезарядки в энергетическом состоянии, что соответствует более высокой скорости счёта в этом разряде и более высокоэнергетичному, чем в разрядах 79 199 и 79 202, энергетическому распределению зарегистрированных атомов водорода.

Данные эксперименты демонстрируют поглощение энергии малой добавкой ионов водорода на первой гармонике при отсутствии НИ и переходе плазмы в L-режим. Динамика измеренного потока атомов перезарядки указывает на то, что при наличии инжекции (начальная фаза ИЦН) энергия волны в основном поглощается высокоэнергетичными ионами пучка через механизм на второй гармонике ионной циклотронной частоты. Такие частицы не были зарегистрированы, поскольку для этого им необходимо совершить двойную перезарядку, что является маловероятным событием. Более того, при применении НИ развитие неустойчивости на границе плазмы препятствует проникновению ВЧ-волны в плазму. После выключения ИЦН счёт спектрометра быстро падает, что обусловливается торможением и изотропизацией скоростей энергичных частиц, их уходом из конуса регистрации спектрометра в пространстве питч-углов.

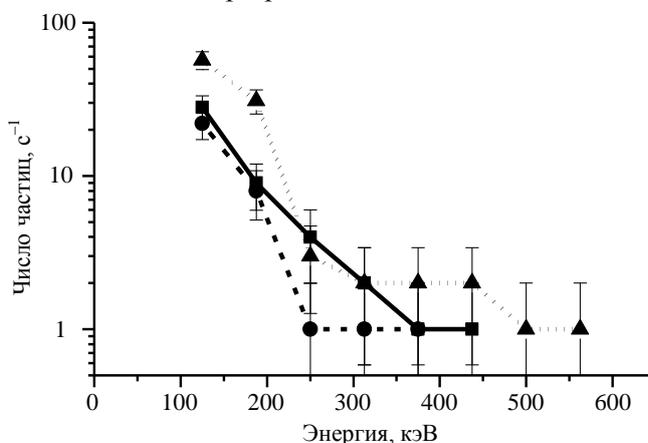


Рис. 5. Спектры атомов водорода, зарегистрированные во время трёх разрядов с одинаковыми сценариями нагрева. В разряде 79 203 плотность плазмы вдвое меньше, чем в двух других разрядах: ■ — 79 199; ● — 79 202; ▲ — 79 203

ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА JET НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БЫСТРЫХ ИОНОВ

Анализ данных АС, полученных в разрядах JET 79 340, 79 341 и 79 343, продемонстрировал влияние дополнительного нагрева на энергетическое распределение ионов в плазме. Компонентный состав плазмы в этих разрядах следующий: основной компонент H, инжектируемый газ D, малая добавка ^3He . ИЦН-нагрев плазмы был сконфигурирован следующим образом (33 МГц / 1,8 МА / 3,41 Тл): резонанс на основной гармонике для инжектируемых частиц (D, резонанс в центре плазмы) и для частиц малой добавки (^3He , пристеночный резонанс) [5]. При одновременной работе инжектора нейтралов, расположенного в октанте 4, и мощного (более 3 МВт) ИЦН-нагрева алмазным спектрометром регистрировались потоки перезарядившегося и доускоренного инжектированного дейтерия с энергией более 80 кэВ (рис. 6, 7). В разрядах 79 341 и 79 343 зарегистрированы частицы с энергией более 200 кэВ, тогда как в разряде 79 340

таких частиц зарегистрировано не было, что является следствием более низкой мощности ИЦР-нагрева в этом разряде в исследуемом интервале времени.

Для максвелловской плазмы функция источника $S(E)$ для распределения выходящего потока атомов перезарядки имеет следующий вид [7]:

$$S(E) = n_0 n_i \langle \sigma_{01} v_i \rangle \frac{2\sqrt{E}}{\pi^{1/2} T_i^{3/2}} \exp(-E/T_i), \quad (1)$$

где n_x — плотность компонента x , см^{-3} ; $\langle \sigma_{01} v_i \rangle$ — скорость (реактивность) перезарядки, $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; E — энергия атомов, покидающих плазму, кэВ; T_i — ионная температура, кэВ. Для характеристики распределения энергичных частиц вводят понятие эффективной температуры энергичной части распределения — величины, определяемой наклоном графика энергетического распределения атомов в логарифмической шкале. При этом в уравнении (1) зависимость \sqrt{E} пренебрегают, поскольку она вносит вклад только в области малых энергий:

$$T_i = - \left(\frac{d(\log S(E))}{dE} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Определённая таким образом эффективная температура «энергичного хвоста» для разряда 79 340 составила 60 кэВ, а для разрядов 79 341 и 79 343 вдвое больше — 120 и 123 кэВ соответственно. Эти результаты демонстрируют более эффективный нагрев инжектированных дейтронов в разрядах 79 341 и 79 343 при мощности ИЦН ~ 4 МВт по сравнению с разрядом 79 340, когда мощность ИЦН была ~ 3 МВт.

Проведённые с помощью цифрового алмазного спектрометра атомов перезарядки на токамаке JET исследования продемонстрировали состоятельность этого метода диагностики плазмы в крупнейшем термоядерном эксперименте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С применением цифрового алмазного спектрометра проведены исследования поведения быстрого ионного компонента высокотемпературной плазмы токамака JET в различных сценариях дополнительного нагрева, определена зависимость эффективной температуры надтепловой части спектра быстрых ионов плазмы от мощности дополнительного нагрева, продемонстрирована зависимость скорости торможения высокоэнергетических ионов от плотности плазмы. Данная работа позволила разработать проект цифрового алмазного спектрометра атомов перезарядки и нейтронов для строящегося токамака ИТЭР.

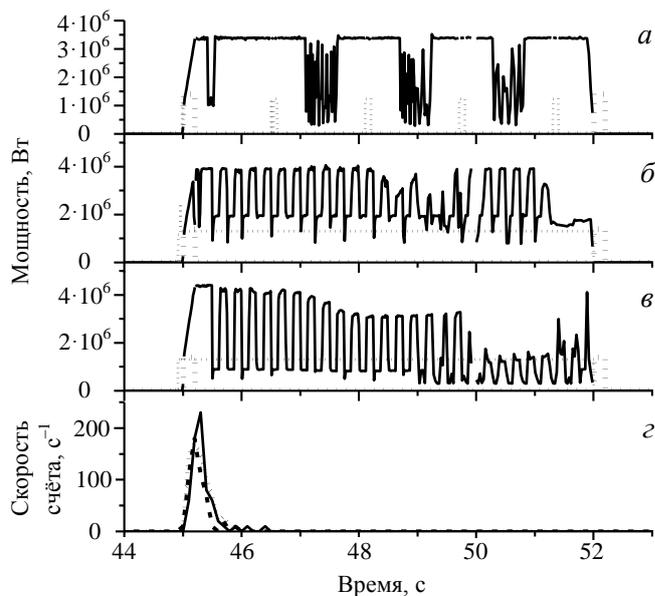


Рис. 6. Временные диаграммы мощности дополнительного нагрева (— ИЦН; ... — НИ октанта 8; ••• — НИ октанта 4) для разрядов 79 340 (а), 79 341 (б), 79 343 (в), а также скорость счёта алмазного спектрометра для этих разрядов: — 79 340; ... — 79 341; ••• — 79 343 (z)

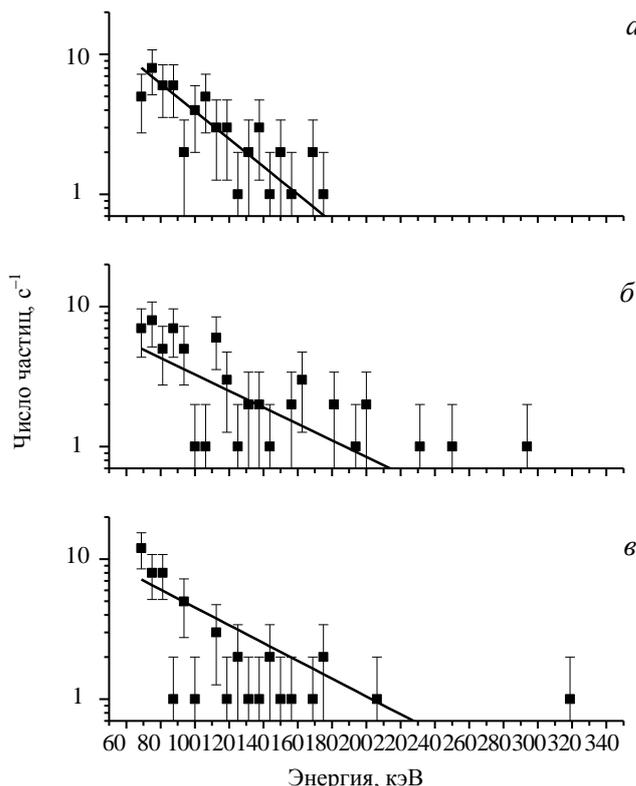


Рис. 7. Энергетические распределения атомов дейтерия, зарегистрированные в разрядах 79 340 (а), 79 341 (б), 79 343 (в) токамака JET

REFERENCES

1. **Krasilnikov V.A.** A diamond-detector-based fast-particle spectrometer with digital signal processing. — *Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and Experimental Techniques)*, 2008, № 4, pp. 44—49 (in Russian).
2. **Murari A. et al.** — *Nucl. Fusion*, 2005, vol. 45, S195.
3. **Krasilnikov A.V.** — *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, vol. 68, № 1, pp. 553—556.
4. http://users.jet.efda.org/tfs1/wiki/index.php/C27:_S12.4.17_LH_transition_and_confinement._Pedestal_width_and_height_scaling_with_ion_mass
5. **Van Eester D. et al.** JET (3He)–D scenarios relying on RF heating: survey of selected recent experiments. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2009, vol. 51, p. 044007.
6. **Amosov V.N., Krasilnikov A.V., Skopintsev D.A., Meshchaninov S.A., Krasilnikov V.A.** A diamond-detector-based system for spectrometry of fast atoms on the JET tokamak. — *Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and Experimental Techniques)*, 2008, № 2, pp. 108—112 (in Russian).
7. **Wesson J.** Tokamaks. Oxford Engineering Science Series. Clarendon Press, Oxford. UK. 1987.

AUTHORS

Krasilnikov V.A. State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Amosov V.N. State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Coffey I. Culham Science Centre, Abingdon, UK.

Popovichev S. Culham Science Centre, Abingdon, UK.

Kashchuk Yu.A., State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Skopintsev D.A., State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Meshchaninov S.A. State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Nemtsev G.E. State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Received 31 October 2012
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2012, issue 4, pp. 97—102.