

УДК 533.9.082

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ИТЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДА ADAS ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

С.В. Серов¹, С.Н. Тугаринов¹, М. von Hellermann²

¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Россия

²ITER Organization, St. Paul-lez-Durance, Франция

В работе речь идёт о моделировании спектров излучения плазмы, возникающих при прохождении через неё диагностического пучка атомов. Моделирование производилось для диагностической системы активной спектроскопии на токамаке ИТЭР. В работе рассматриваются основные принципы работы данной диагностики и описываются способы измерения параметров плазмы с её помощью. Приводится описание работы активной спектроскопии на установке ИТЭР. Описывается пакет ADAS, который использовался в качестве источника атомных данных, необходимых для проведения моделирования. Рассматривается код Simulation of Spectra, созданный специально для моделирования спектральных профилей активной спектроскопии. Описываются его возможности, а также основные принципы его работы. Приведены параметры плазмы ИТЭР и диагностического пучка атомов, для которых выполнены расчёты. Представлены профили излучения, полученные в результате моделирования для различных диапазонов длин волн. Рассмотрены причины возникновения сложной структуры спектров плазмы, регистрируемых данной диагностикой. Показано, что активная спектроскопия должна позволить измерять все необходимые параметры плазмы в соответствии с требованиями ИТЭР.

Ключевые слова: активная спектроскопия, CXRS, ИТЭР, моделирование, ADAS, Simulation of Spectra.

ITER PLASMA SPECTRA MODELLING FOR CHARGE EXCHANGE RECOMBINATION SPECTROSCOPY USING ADAS CODE

S.V. Serov¹, S.N. Tugarinov¹, M. von Hellermann²

¹SRC RF TRINITI, Moscow, Russia

²ITER Organization, St. Paul-lez-Durance, France

The paper discusses the modelling of plasma spectra due to diagnostic neutral beam. Charge exchange recombination spectroscopy for ITER tokamak is considered. The main principles and capabilities of this diagnostics are described. The ADAS package, used as an atomic data source for the modelling, is described. The main principles of spectra modelling in presence of the diagnostic neutral beam are considered. Simulation of Spectra code, created specifically for CXRS modelling on different tokamaks is described. ITER discharge and diagnostic beam parameters used in modelling are specified. The results of spectral profiles modelling for different wavelengths regions and are presented. The sophisticated shape of CXRS spectral profiles is explained. It is shown that CXRS diagnostic should allow performing all the necessary measurements in accordance with ITER requirements.

Key words: charge exchange recombination spectroscopy, CXRS, ITER, modelling, ADAS, Simulation of Spectra.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-2-89-94

ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой частью любого современного токамака, а также будущего токамака-реактора является комплекс средств диагностики термоядерной плазмы. Для измерения таких важнейших параметров плазмы, как профиль ионной температуры, профили концентрации лёгких примесей и скорости вращения плазмы в токамаках, используется активная корпускулярно-спектроскопическая диагностика, обозначаемая в англоязычной литературе аббревиатурой CXRS (charge exchange recombination spectroscopy). Впервые предложение использовать метод активной корпускулярно-спектроскопической диагностики было сделано в конце 1970-х годов [1], первые эксперименты по измерению параметров плазмы токамаков с использованием активной спектроскопии были проведены в начале 1980-х годов [2—4]. В настоящее время эта диагностика используется на большинстве крупнейших токамаков.

В работе [5] было показано, что активную спектроскопию можно будет использовать и на строящемся токамаке ИТЭР (ITER — International Thermonuclear Experimental Reactor). Диагностика CXRS на ИТЭР будет состоять из двух систем: CXRS-Core и CXRS-Edge. Первая будет наблюдать внутреннюю часть плазменного шнура от центра до середины радиуса, вторая — внешнюю область от середины радиуса до границы плазмы. Система CXRS-Edge разрабатывается и будет изготавливаться в Российской

Федерации. Диагностика CXRS-Edge должна обеспечивать измерения таких важных параметров плазмы, как профиль ионной температуры, профили концентрации примесей, в том числе и «гелиевой золы», и профили скоростей тороидального и полоидального вращения. Для корректного измерения этих параметров необходимо хорошо понимать структуру регистрируемого спектра, а значит иметь хорошую модель излучения плазмы. Поэтому моделирование спектров активной спектроскопии для условий ИТЭР является важной задачей.

В этой работе рассматриваются основные принципы работы диагностики активной спектроскопии и схема её устройства на установке ИТЭР. Приводится описание пакета ADAS и специального кода Simulation of Spectra, которые используются для моделирования спектров излучения из плазмы, возникающих при прохождении через неё диагностического пучка атомов. Описаны параметры и рассмотрены принципы моделирования спектров CXRS. Представлены спектральные профили, полученные для различных диапазонов длин волн. Показано, что профили излучения активной спектроскопии на установке ИТЭР должны позволить измерять требуемые параметры плазмы в соответствии с требованиями ИТЭР.

УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НА УСТАНОВКЕ ИТЭР

Принцип работы активной спектроскопии подробно описан в [6, 7]. Он состоит в том, что в плазму инжектируется пучок высокоэнергичных атомов, обычно водорода. Внутри объёма, занимаемого пучком, идёт интенсивная реакция перезарядки атомов пучка на ионах основной плазмы. Поскольку лёгкие примеси и рабочий газ в центральных областях плазмы присутствуют в состоянии голых ядер, то в результате этой реакции возникает водородоподобный ион в возбуждённом состоянии и возбуждение снимается за счёт излучения. Оно собирается оптической системой сбора излучения и передаётся на спектрометр. Ионная температура и скорость направленного движения плазмы могут быть определены по доплеровскому уширению и сдвигу спектральной линии, возникающей из-за реакции перезарядки атомов пучка на ядрах примеси (так называемой активной линии). Концентрация примесей определяется по абсолютной интенсивности излучения этой линии. Поэтому для определения параметров плазмы необходимо выделить активную линию из полученного профиля. Для этого используется аппроксимация измеренного спектрального контура линии набором гауссовских контуров (так называемый «фиттинг» спектрального контура). Значит, для корректной работы диагностики активной спектроскопии

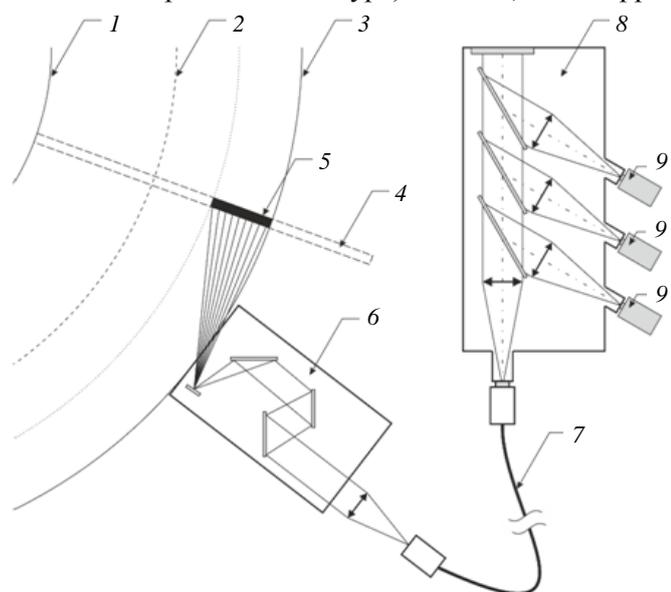


Рис. 1. Схема расположения диагностической системы CXRS-Edge на установке ИТЭР (вид сверху): 1 — внутренняя граница плазмы; 2 — центр плазменного шнура; 3 — внешняя граница плазмы; 4 — диагностический пучок; 5 — область сбора света; 6 — оптическая система сбора излучения; 7 — волоконно-оптический тракт; 8 — 3-канальный спектральный прибор; 9 — ПЗС-камеры, регистрирующие излучение в трёх спектральных диапазонах

необходимо иметь хорошую модель излучения из плазмы, которая позволит учесть все присутствующие в спектре линии и выделить активную линию перезарядки.

Схема устройства диагностики CXRS-Edge на установке ИТЭР показана на рис. 1. Диагностический пучок будет инжектироваться в плазму горизонтально в центральном сечении установки, перпендикулярно тороидальному полю. Диагностика будет располагаться в соседнем экваториальном порту и будет проводить измерения для внешней части плазменного шнура — от точки входа в плазму до середины малого радиуса плазмы. Схема наблюдения выбрана так, чтобы хорды наблюдения не пересекали диверторную область установки, так как мощное излучение, возникающее в диверторе, затруднит выделение активного сигнала. Излучение собирается оптической системой по 26 хордам и с помощью оптической системы волокон передаётся на девять светосильных спектрометров, находящихся в области

расположения диагностической аппаратуры. Каждый спектрометр имеет три канала, которые позволяют проводить регистрацию трёх спектральных диапазонов одновременно: 464—471, 523—531 и 649—663 нм.

Согласно требованиям ИТЭР [8] диагностика CXRS-Edge должна обеспечивать измерения таких параметров плазмы, как профиль ионной температуры, профили концентрации примесей, профили скоростей вращения с временным разрешением 10—100 мс и точностью 10—30% в зависимости от параметра. Пространственное разрешение должно быть 2 см для внешней части плазменного шнура (до 0,85 малого радиуса плазмы) и 6 см для внутренней. Поэтому регистрируемые спектральные профили должны обладать достаточным количеством информации для получения измеряемых параметров плазмы, т.е. важно, чтобы контур активной линии выделялся на фоне флуктуаций тормозного континуума. Для количественной оценки обычно используется соотношение сигнал—шум или SNR (signal to noise ratio), т.е. отношение интенсивности активного сигнала к величине флуктуаций тормозного излучения. Измеряя это соотношение для спектрального профиля, можно судить о том, на сколько точно можно будет определить параметры плазмы из этого профиля. Требуемой для ИТЭР точности 10% примерно соответствует соотношение сигнал—шум порядка 10 [5, 9].

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

В данной работе моделирование производилось для индуктивного сценария работы ИТЭР, рассчитанного с помощью транспортного кода ASTRA [10], со следующими параметрами: отношение термоядерной мощности к мощности дополнительного нагрева $Q = 10$, ток плазмы $I = 15$ МА, мощность $P = 500$ МВт. Профили плотности электронов n_e , электронной T_e и ионной температуры T_i , тороидальной v_t и полоидальной скорости v_p вращения изображены на рис. 2. Использовались следующие плотности компонентов плазмы: $n_{D+T} = 0,77n_e$, $n_{He} = 0,04n_e$, $n_{Be} = 0,01n_e$, $n_C = 0,001n_e$, $n_{Ne} = 0,003n_e$. Диагностический пучок — водородный с одним энергетическим компонентом 100 кэВ, размером 0,3×0,3 м и током 36 А. Параметры оптической системы, спектрометра и ПЗС-камер выбраны в соответствии с текущей конструкцией и существующими прототипами. Время регистрации 10 мс, что соответствует требуемому временному разрешению. Моделирование производилось для середины радиуса плазменного шнура, так как для диагностики CXRS-Edge именно там выделение активного сигнала представляет наибольшую трудность.

Для моделирования работы активной спектроскопии Манфредом Хелерманом в среде Matlab был создан код Simulation of Spectra [11]. Данный код производит моделирование спектров активной спектроскопии для выбранной активной линии, исходя из параметров плазмы, геометрии измерений, параметров диагностического пучка, оптической системы сбора света и схемы измерений, а также технических характеристик спектрометра. Код работает по следующей схеме: сначала вычисляются необходи-

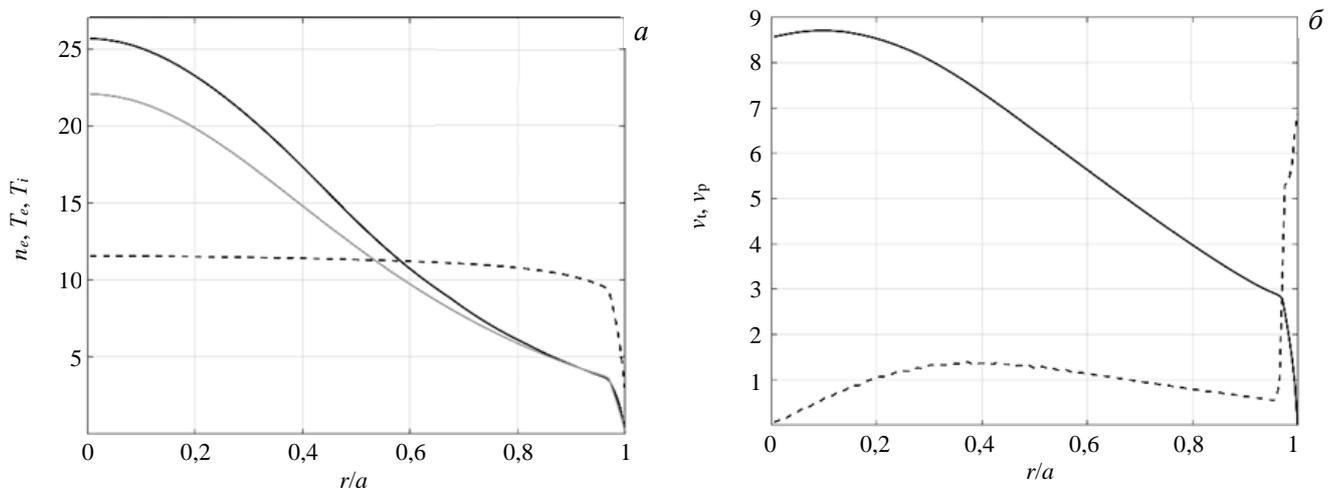


Рис. 2. Используемые при моделировании профили плотности электронов n_e ($\text{м}^{-3} \cdot 10^{19}$) (---), электронной температуры T_e (кэВ) (—), ионной температуры T_i (кэВ) (· · ·) (а), тороидальной v_t (10 км/с) (—) и полоидальной v_p (км/с) (- - -) скорости вращения (б) для расчётного индуктивного сценария работы ИТЭР с параметрами $Q = 10$, $I = 15$ МА, $P = 500$ МВт

мые геометрические параметры установки, такие как угол между хордой наблюдения и направлением диагностического пучка. Затем вычисляется ослабление диагностического пучка вдоль пути его прохождения по плазме. Потом вычисляется интенсивность активной линии перезарядки, излучающей из области пересечения линии наблюдения и диагностического пучка. При этом учитывается, что на форму и интенсивность активной линии влияют инструментальный профиль, эффект тонкой структуры, зависимость сечения перезарядки от энергии [12, 13] и эффект гало [14]. После этого вычисляются интенсивность линии пассивной перезарядки (перезарядка на атомах водорода, находящиеся на периферии плазмы) и интенсивность излучения с границы. Затем вычисляется уровень континуума путём интеграции интенсивности тормозного излучения вдоль линии наблюдения. Все компоненты суммируются, и программа строит профиль излучения плазмы с разложением по компонентам, что позволяет оценить их вклад в суммарный профиль.

Атомные данные, необходимые для моделирования излучения CXRS, были взяты из пакета ADAS (atomic data and analysis structure) [15]. Пакет ADAS был создан на токамаке JET в конце 1980-х годов и изначально использовался для обработки данных активной спектроскопической диагностики [16]. Сегодня пакет ADAS представляет собой набор взаимосвязанных компьютерных кодов и базу данных с большим количеством фундаментальных и производных атомных данных. В его состав входит графическая подсистема, которая позволяет извлекать и отображать атомные данные. Данные ADAS используются во многих кодах, моделирующих плазму, таких как B2-IRENE, CHEAP, DIVIMP, EDGE2D, SANCO и STRAHL [17]. ADAS содержит все атомные данные, необходимые для моделирования спектров и обработки данных активной спектроскопии — от сечений ослабления диагностического пучка до скоростных коэффициентов возбуждения используемых спектральных переходов. Эти данные ADAS считаются самыми надёжными данными для CXRS и широко используются на многих термоядерных установках, где работает эта диагностика.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Спектры, полученные в результате моделирования излучения в спектральных диапазонах 464—471 и 523—531 нм, изображены на рис. 3 и 4 соответственно. Видно, что, помимо спектральной линии, возникающей из-за реакции перезарядки атомов пучка на ядрах примеси, спектры содержат и другие линии, накладывающиеся на активную линию.

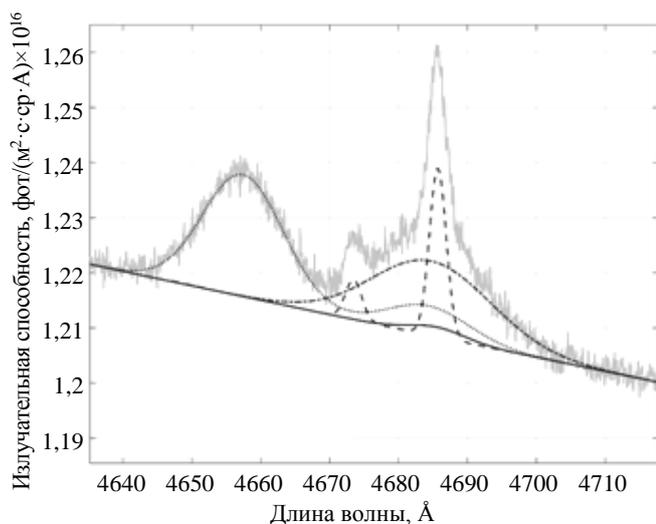


Рис. 3. Смоделированный спектральный профиль для диапазона 4640—4710 Å (—) и его разложение по компонентам: активная линия перезарядки He II (---) (4—3) 4683 Å, пассивная линия перезарядки He II 4685 Å (—), излучение с границы (линии He II 4685 Å, Be II 4673 Å) (- - -) и активные линии Be IV (6—5) и Be IV (8—6) 4658 и 4685 Å (.....)

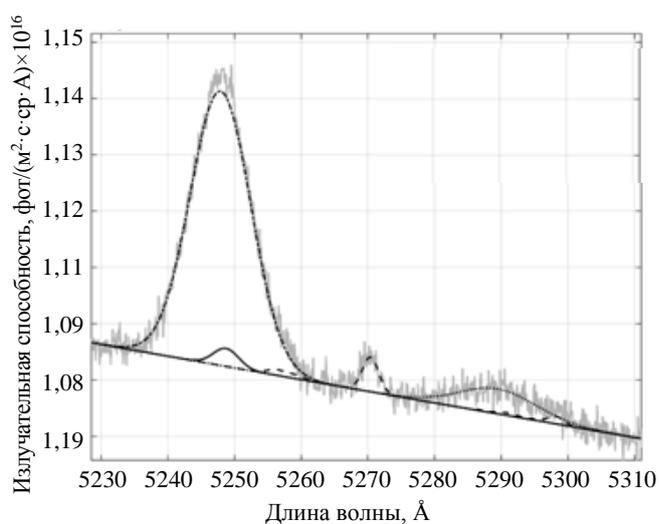


Рис. 4. Смоделированный спектральный профиль для диапазона 5230—5310 Å (—) и его разложение по компонентам: активная линия перезарядки Ne X (11—10) 5248 Å (---), пассивная линия перезарядки Ne X 5249 Å (—), излучение с границы (линии Be II 5255 Å и 5270 Å, C VI 5291 Å, Ne I 5298 Å) (- - -) и активная линия C VI (8—7) (.....)

Так как перезарядка ионов примеси происходит не только на атомах инжектируемого пучка, но также и на атомах водорода, находящихся на периферии плазмы, то в спектре появляется линия пассивной перезарядки. В токамаке присутствуют атомы рабочего газа и примесей, непрерывно поступающие в плазму со стенок камеры. Они имеют малую скорость и не способны проникать глубоко в плазму из-за быстрой ионизации на периферии шнура. В результате возбуждения от соударения с электронами они излучают в узком слое на периферии плазменного шнура. Соответствующие линии обозначены на рис. 3 и 4 как излучение с границы. Следует также обратить внимание на высокий уровень континуума, возникающего за счёт тормозного излучения. Он значительно превосходит уровень активного сигнала, и это является отличительной особенностью спектров активной спектроскопии на ИТЭР от существующих токамаков. Для всех полученных в результате моделирования спектров соотношение сигнал—шум составляло не меньше 10.

Одной из сложностей, с которой сталкиваются все спектроскопические диагностики на установке ИТЭР, является большое количество света, отражённого от стенок камеры. Оказывается, что наличие фоновой засветки и рассеянного диверторного света не сильно сказывается на работе CXRS-диагностики. Дело в том, что для определения параметров плазмы интерес представляет широкая активная линия, излучающая только из области прохождения диагностического пучка через плазму. Значения же температуры в диверторе как минимум на порядок меньше минимальных температур, измеряемых активной спектроскопией, которые достигаются при измерении температуры на периферии плазмы. Наличие фоновой засветки и рассеянного диверторного света лишь поднимает уровень континуума и не влияет на способность выделить активную линию. Подробное исследование влияния рассеянного света на работу активной спектроскопии приведено в работе [18].

Стоит отметить, что при моделировании необходимо учитывать вклад в спектральные профили эффектов перезарядки не только на диагностическом, но и на нагревном дейтериевом пучке атомов. Однако при моделировании активной спектроскопии на токамаке ИТЭР этот вклад можно не учитывать, потому что на ИТЭР будет использоваться нагревный пучок атомов энергией 1 МэВ, а для такой энергии скоростные коэффициенты перезарядки становятся на несколько порядков меньше, чем для энергии 100 кэВ диагностического пучка атомов.

Также необходимо ответить на вопрос, а можно ли доверять спектральным профилям, полученным с помощью кода Simulation of Spectra? Для этого в коде предусмотрена возможность моделировать работу активной спектроскопии на существующих токамаках. В процессе создания кода проводилось сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными для многих токамаков, в том числе для JET и TEXTOR [11]. По результатам такого сравнения можно сделать вывод, что смоделированная активная линия находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными, в то время как для пассивной линии перезарядки и линий с границы соответствие уже не такое хорошее. Например, при проведении моделирования разряда № 87404 на токамаке JET отличие расчётной температуры активной линии C VI от экспериментальной составило 15%. В то же время яркая линия Be II с границы и по интенсивности, и по температуре была меньше экспериментальной примерно в 2 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого в работе моделирования были получены представления о том, как будут выглядеть спектры диагностики активной спектроскопии на токамаке ИТЭР. Моделирование CXRS на современных токамаках с помощью кода Simulation of Spectra позволяет получить спектральные профили, близкие к экспериментальным. Поэтому можно считать, что спектры, полученные с помощью этого кода для активной спектроскопии ИТЭР, будут соответствовать экспериментальным данным. Их можно использовать для отработки методики обработки данных для этой установки. Для всех полученных в результате моделирования спектров соотношение сигнал—шум составляло порядка 10 и более, что позволяет предположить, что данная диагностика позволит проводить измерения требуемых параметров плазмы от середины малого радиуса до границы шнура с точностью, не ниже требуемой для ИТЭР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афросимов В.В. и др. — Письма в ЖТФ, 1977, т. 3, с. 97—101.
2. Зиновьев А.Н. и др. — Письма ЖЭТФ, 1980, т. 32, вып. 9, с. 557—560.
3. Березовский Е.Л. и др. — Письма в ЖТФ, 1982, т. 8, с. 1382—1385.
4. Fonck R.J. et al. — Physical Review A, 1984, vol. 29, p. 6.
5. Тугаринов С.Н. и др. — Физика плазмы, 2004, т. 30, № 2, p. 147—154.
6. Зиновьев А.Н. и др. — В сб.: Диагностика плазмы. Под ред. М.И. Пергамента. — М.: Энергоиздат, 1990, вып. 7, с. 56—111.
7. Isler R.C. — Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, vol. 36, p. 171.
8. Donne A.J.H. et al. — Nuclear Fusion, 2007, vol. 47, p. S337.
9. Malaquias A. et al. — Rev. Sci. Instrum., 2004, vol. 75, № 10, p. 3393.
10. Polevoi A.R. et al. — J. Plasma Fusion Res. SERIES, 2002, vol. 5, p. 82—87.
11. Von Hellermann M. et al. — Physica Scripta, 2005, vol. T120, p. 19.
12. Howell R. et al. — Sci. Instrum., 1988, vol. 59, p. 1521—1523.
13. Von Hellermann M. et al. — Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, vol. 37, p. 71.
14. Grierson B. et al. — Rev. Sci. Instrum., 2012, vol. 83, p. 10D529.
15. Summers H.P. et al. — In: AIP Conf. Proc., 2007, vol. 901, p. 239—248.
16. Boileau A. et al. — Plasma Phys. Control. Fusion, 1989, vol. 31, № 5, p. 779—804.
17. <http://www.adas.ac.uk>.
18. Kajita S. et al. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2015, vol. 57, p. 045009.



Станислав Вадимович Серов, инженер; ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиновых вл. 12, Россия



Сергей Николаевич Тугаринов, с.н.с., руководитель работ по разработке CXRS-диагностики для ИТЭР; ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиновых вл. 12, Россия



Manfred von Hellermann, сторонний консультант в диагностической команде ИТЭР, доктор; ITER Organization, Route de Vinon-sur-Verdon, CS 90 046, 13067 St. Paul-lez-Durance, France

Статья поступила в редакцию 25 января 2018 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 2, с. 89—94.