

УДК 533.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ПАССИВНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ ВОДОРОДОПОДОБНЫХ ИОНОВ БЕРИЛЛИЯ ДЛЯ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ТОКАМАКЕ ИТЭР

П.А. Сдвиженский¹, М.Г. Левашова¹, А.Б. Кукушкин^{1, 2}, В.С. Лисица^{1, 2}, В.С. Неверов¹, Ю.А. Ромазанов³,
С.В. Серов⁴, И.Ю. Толстикова⁵, С.Н. Тугаринов⁴

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³Научно-исследовательский центр Юлиха, Институт энергетических и климатических исследований, Отдел физика плазмы, Партнёр трёхстороннего кластера Euregio, Юлих, Германия

⁴Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия

⁵Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Для одного из расчётных сценариев работы дивертора в ИТЭР выполнены расчёты фонового излучения от пассивной перезарядки для одной из линий иона бериллия Be IV, используемой для диагностики «Активная спектроскопия пристеночной плазмы». Рассчитан вклад перезарядки ионов бериллия Be V на нейтральных атомах дейтерия в основном и первом возбуждённом состояниях. Используются сечения реакции перезарядки, рассчитанные численным кодом ARSENY и другими кодами. Используются данные из базы данных моделирования пристеночной плазмы ИТЭР на основе численного кода SOLPS: расчёты кинетики рециклинга дейтерия кодом EIRENE и эрозии бериллиевой первой стенки кодом ERO2.0.

Ключевые слова: активная спектроскопия, пассивная перезарядка, пристеночная плазма, ИТЭР.

SIMULATION OF PASSIVE CHARGE EXCHANGE SIGNALS OF HYDROGEN-LIKE BERYLLIUM IONS FOR CXRS EDGE DIAGNOSTICS IN ITER

P.A. Sdvizhenskii¹, M.G. Levashova¹, A.B. Kukushkin^{1, 2}, V.S. Lisitsa^{1, 2}, V.S. Neverov¹, Yu.A. Romazanov³,
S.V. Serov⁴, I.Yu. Tolstikhina⁵, S.N. Tugarinov⁴

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

³Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie und Klimaforschung—Plasmaphysik, Partner of the Trilateral Euregio Cluster (TEC), Jülich, Germany

⁴Institution «Project Center ITER», Moscow, Russia

⁵P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

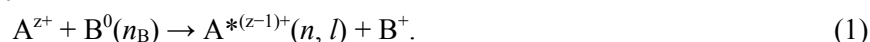
For one of the divertor's operation scenarios in ITER, the background radiation from passive charge exchange was calculated for one of the beryllium (Be IV) spectral lines used for Charge eXchange Recombination Spectroscopy (CXRS) diagnostics. The contribution of the charge exchange of beryllium ions Be V on neutral deuterium atoms in the ground and first excited states is calculated. The cross sections for the charge exchange reaction calculated by the numerical code ARSENY and other codes are used. The data from the ITER edge plasma modeling database is used based on the SOLPS numerical code: calculations of the kinetics of deuterium recycling by the EIRENE code and the erosion of the beryllium first wall by the ERO2.0 code.

Key words: CXRS diagnostics, passive charge exchange, edge plasma, ITER.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-4-27-38

ВВЕДЕНИЕ

Активная спектроскопическая диагностика (в англоязычной литературе — Charge-eXchange Recombination Spectroscopy, CXRS) широко применяется на современных токамаках для измерения таких важных параметров плазмы, как концентрация примесей, температура ионов и скорость вращения плазмы. В основе этой диагностики лежит анализ спектров излучения, которое возникает вследствие зондирования плазмы пучком нейтральных атомов (может использоваться как нагревный, так и диагностический пучок). В той области, где пучок проходит через плазму, происходят реакции перезарядки, которые могут быть записаны в следующем общем виде:



Ион плазмы A^{z+} взаимодействует с нейтральным атомом B^0 в состоянии с главным квантовым числом n_B из пучка и перехватывает у него электрон. Обычно электрон захватывается в возбуждённое состояние $A^{*(z-1)+}(n, l)$, где n и l — главное и орбитальное квантовое число соответственно. Излучение, которое возникает при переходе электрона из этого состояния в более низкие возбуждённые, собирается оптической системой и доставляется в спектрометр (рис. 1). Для активной спектроскопии используются реакции типа (1) с участием ядер лёгких примесей.

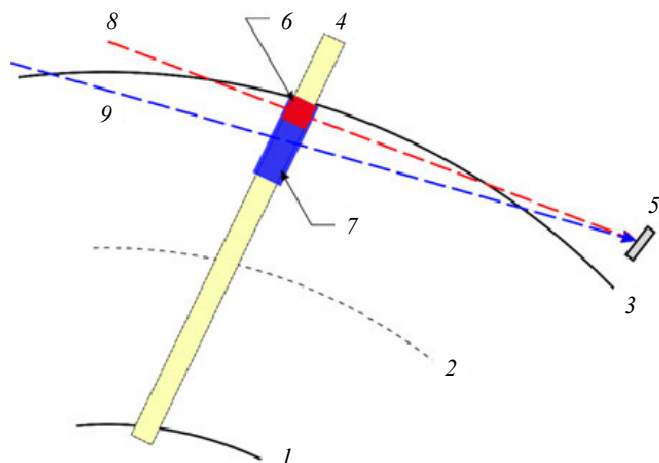
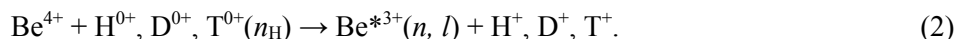


Рис. 1. Схема сбора излучения из плазмы (вид сверху): 1 — внутренняя граница плазмы; 2 — ось плазменного шнура; 3 — внешняя граница плазмы; 4 — диагностический пучок; 5 — первое зеркало оптической системы сбора света; 6 — поле зрения верхней системы; 7 — поле зрения нижней системы; 8 — линия наблюдения los 1 (los — сокращение от line of sight); 9 — линия наблюдения los 2

На установке ИТЭР диагностика «Активная спектроскопия» будет состоять из трёх систем: CXRS Core, CXRS Edge и CXRS Pedestal. Система CXRS Edge разрабатывается и будет изготавливаться в России [1, 2]. Она будет располагаться в третьем экваториальном порту и будет проводить измерения для внешней части плазменного шнура — от точки входа диагностического водородного пучка в плазму до середины малого радиуса плазмы. Излучение собирается оптической системой по 26 хордам и с помощью оптических волокон передаётся на девять светосильных спектрометров: на пять спектрометров попадает излучение из 10 центральных хорд ($0,5 < \rho < 0,85$), на другие четыре спектрометра — из 16 хорд с границы плазмы ($\rho > 0,85$). Каждый спектрометр имеет три канала, которые позволяют проводить регистрацию трёх спектральных диапазонов одновременно: синего 464—471 нм, зелёного 523—531 нм и красного 651—661 нм. Использование трёх каналов позволяет проводить измерения одновременно для следующих элементов: H (D, T), He, Be, C, Ne. В синий диапазон попадают спектральные линии He II (4—3) 4686 Å, Be IV(6—5) 4658 Å, Be IV(8—6) 4685 Å. В зелёный диапазон попадают линии C VI (8—7) 5291 Å, Ne X (11—10) 5249 Å. В красный диапазон попадают линии бальмер-альфа активной перезарядки изотопов водорода, а также линия излучения пучка (BES). В настоящей работе проведены расчёты только для линии Be IV(6—5) 4658 Å.

Для надёжной интерпретации измерений необходимо предсказательное моделирование спектров излучения плазмы.

В настоящей статье рассматривается переход водородоподобного иона бериллия Be IV 4658.42 Å (переход $n = 6 \rightarrow 5$), который будет использован при реализации диагностики «Активная спектроскопия» в ИТЭР. Реакция (1) в случае перезарядки голых ядер бериллия на изотопах водорода имеет вид



Излучение, собранное вдоль линии наблюдения, содержит следующие компоненты:

- линии активной перезарядки (перезарядка ядер примесей на диагностическом пучке атомов водорода);
- линии пассивной перезарядки (перезарядка ядер примесей на атомах водорода в периферийной плазме);
- линии фонового излучения, возникающего в результате возбуждения ионов и атомов электронным ударом в периферийной плазме;
- излучение плазмы в непрерывном спектре.

В настоящей статье представлены результаты моделирования сигнала фонового излучения водородоподобных линий пассивной перезарядки бериллия. Пассивный сигнал в активной спектроскопической диагностике формируется вследствие перезарядки ионов периферии плазмы токамака на нейтральных атомах изотопов водорода, поступающих со стенки камеры в результате рециклинга. При этом главный вклад в фоновое излучение пассивной перезарядки дают реакции, в которых электрон захватывается на

те уровни энергии, излучательные переходы с которых используются в диагностике. Предсказательное моделирование пассивного сигнала остаётся актуальной проблемой, поскольку требует совместного решения ряда теоретических задач, для чего необходимо сложное численное моделирование, пока в нужном объёме не проведённое.

Как указано, помимо спектральной линии, возникающей из-за пассивной перезарядки, спектры содержат и другие компоненты фонового излучения.

Кроме линий пассивной перезарядки, на активную линию накладываются линии излучения, возникающие в узком слое на периферии плазменного шнура в результате возбуждения электронным ударом ионов и атомов рабочего газа и примесей, которые поступают в плазму со стенок камеры. Атомы и ионы с сильными линиями в диапазоне видимого света не проникают глубоко в плазму из-за быстрой ионизации на периферии шнура, при этом характерные значения температуры заметно ниже значений, измеряемых активной спектроскопией, поэтому наличие таких узких линий в спектре не сильно влияет на выделение широкой линии активной перезарядки.

Отличительной особенностью ожидаемых спектров активной спектроскопии на ИТЭР от существующих токамаков является то, что спектральная интенсивность излучения плазмы в непрерывном спектре, обусловленная тормозным излучением, значительно превосходит активный сигнал. Количественные оценки [2] отношения интенсивности полезного сигнала к величине флуктуаций тормозного излучения для всех полученных там спектров дали отношение сигнал—шум, равное величине ~ 10 и более. Поэтому вклад тормозного фона не мешает измерению искомых параметров плазмы с точностью, требуемой для ИТЭР.

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАССИВНОГО СИГНАЛА

Для моделирования пассивного сигнала в диагностике CXRS Edge нами был разработан алгоритм [3] (рис. 2), который включает следующее:

- использование данных моделирования плазмы в области Scrape-Off Layer (SOL) и дивертора с учётом примесей, которые должны будут диагностироваться с помощью системы CXRS Edge (такие данные накапливаются и пополняются; для ИТЭР см., например, моделирование с помощью кодов SOLPS (B2-EIRENE) [4] и OEDGE (OSM+EIRENE+DIVIMP) [5]);
- использование расчётов функции распределения по скоростям (ФРС) нейтральных атомов изотопов водорода в плазме, моделирование которой описано в предыдущем предложении с помощью автономного моделирования кодом EIRENE [6];
- анализ сечений реакций перезарядки, которые являются источником высоковозбуждённых атомных состояний водородоподобных ионов примесей из-за столкновений ядер примесей с нейтральными атомами изотопов водорода, включая их низковозбуждённые состояния, основной плазмы;



Рис. 2. Общая схема алгоритма моделирования пассивного сигнала

- расчёт сечений перезарядки с помощью кода ARSENY [7], необходимый в случае нехватки данных о сечениях в существующих базах данных;
- расчёт скорости упомянутых реакций для существенно немаксвелловских ФРС нейтральных атомов изотопов водорода;
- расчёт эффективных коэффициентов эмиссии фотонов (effective emission coefficients) ионом бериллия в водородной плазме для спектральных линий в видимой части спектра, находящихся вне пределов данных, доступных в базе данных ADAS [8] или аналогичных источниках (эти данные могут быть сгенерированы с помощью кода *nl-KINRYD* [9], аналогично вычислению активного сигнала CXRS в [10]);
- расчёт радиального профиля плотности иона бериллия Be V с помощью кода ERO2.0 [11];
- расчёт спектрального распределения сигнала пассивной перезарядки, использующий результаты двух предыдущих пунктов.

Более подробные разъяснения, касающиеся различных элементов алгоритма, приведены далее.

ДАнные ПРедсказательного МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАЗМЫ

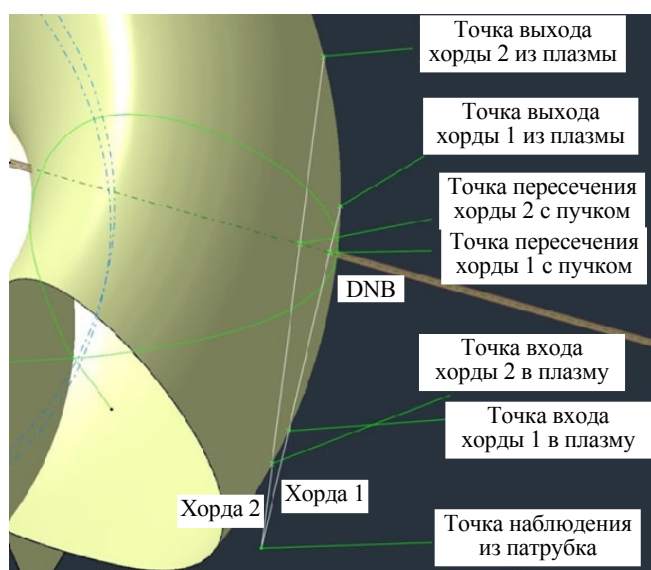


Рис. 3. Геометрия хорд los 1 и los 2, соответствующих центрам полей зрения диагностики «Активная спектроскопия». Линии наблюдения показаны белым цветом: хорда 1 — линия наблюдения los 1, хорда 2 — линия наблюдения los 2; DNB — диагностический пучок нейтральных атомов (diagnostic neutral beam)

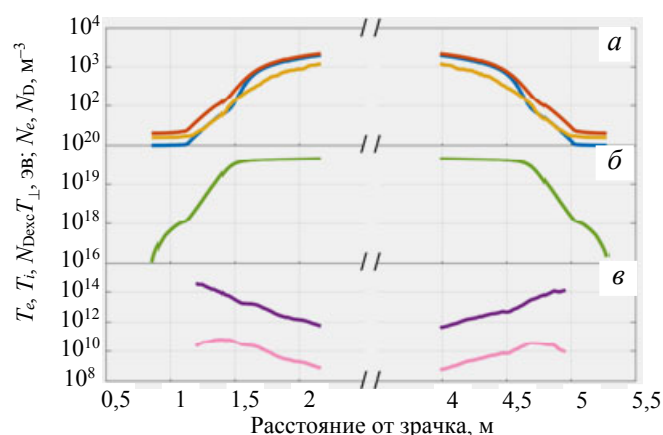


Рис. 4. Зависимость различных параметров плазмы в расчётном сценарии «d» от расстояния от зрачка вдоль линии наблюдения los 1: а — температура электронов T_e (—), ионов T_i (—) и «перпендикулярная температура» $T_{\perp}$ нейтральных атомов дейтерия (—), эВ; б — плотность электронов N_e (—); в — плотность нейтральных атомов дейтерия в основном N_D (—) и первом возбужденном N_{Dexc} (—) состояниях, m^{-3}

Для моделирования сигнала пассивной перезарядки необходимы профили параметров плазмы вдоль линий наблюдения диагностики (рис. 2). На рис. 3 показаны линии наблюдения los 1 и los 2, проходящие через центр полей зрения верхней и нижней оптической системы сбора света диагностики «Активная спектроскопия». Далее приведены профили параметров плазмы вдоль los 1 и los 2 для расчётного сценария «d» работы дивертора ИТЭР [12], которые используются в качестве синтетических экспериментальных данных. Эти профили были получены в результате моделирования с помощью кода SOLPS4.3 [4] (основанного на коде B2-EIRENE [13, 6]) на численной сетке, расширенной с помощью кода OSM [5]. Краткое описание и классификация расчётных режимов [12] представлены в [14, 15]. В качестве данных о профилях плотности иона бериллия Be V использовались результаты моделирования [16] с помощью кода ERO2.0, первое использование которого для моделирования миграции бериллия в ИТЭР представлено в [11] (использованы результаты расчётов сценария, наиболее близкого к указанному сценарию «d»).

На рис. 4 и 5 показаны профили основных параметров плазмы: температуры электронов и ионов и «перпендикулярная температура» нейтральных атомов дейтерия, т.е. эффективная температура, соответствующая средней кинетической энергии перпендикулярного к стенке компонента движения, $T_{\perp} \equiv 2 \langle E_{kin \perp} \rangle$ (температура измеряется в энергетических единицах; эта характеристика важна для расчёта кинетической скорости перезарядки с учётом отклонения ФРС нейтральных атомов изотопов водорода от максвелловской, что приводит к существенному — местами

до 2—3 раз — отличию «эффективной температуры» атомов от температуры ионов); плотности электронов; плотности нейтральных атомов дейтерия в основном (с главным квантовым числом $n_H = 1$) и первом возбуждённом ($n_H = 2$) состояниях. При расчётах плотности нейтральных атомов дейтерия в первом возбуждённом состоянии использовались данные о коэффициентах излучения фотонов (photon emissivity coefficients, PEC) из базы данных OPEN-ADAS [17]. Необходимо отметить, что в базе данных ИТЭР данные о $\langle E_{kin \perp} \rangle$ имеются только для некоторых режимов и только вдоль горизонтальной хорды в экваториальной плоскости (такая хорда перпендикулярна к стенке вакуумной камеры). Эти данные были интерполированы на линии наблюдения los 1 и los 2 на основе анализа профилей параметров плазмы: точкам на линиях наблюдения los 1 и los 2 с данной температурой ионов присваивались те значения $\langle E_{kin \perp} \rangle$, которые имеют место для точек на горизонтальной хорде с такой же температурой ионов. Сравнение профилей параметров плазмы для различных линий наблюдения показано на рис. 6 и 7.

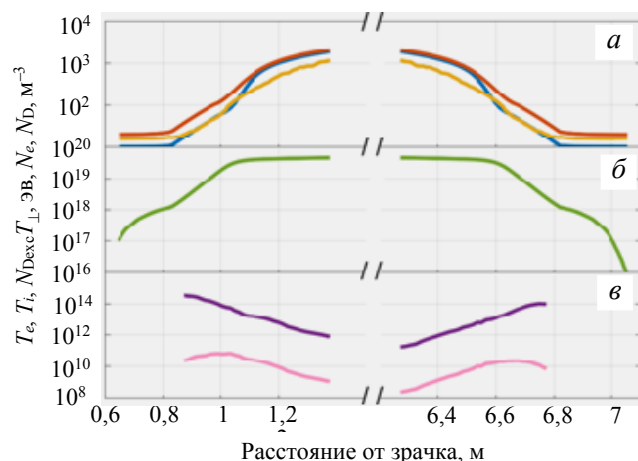


Рис. 5. То же, что на рис. 4, но вдоль линии наблюдения los 2

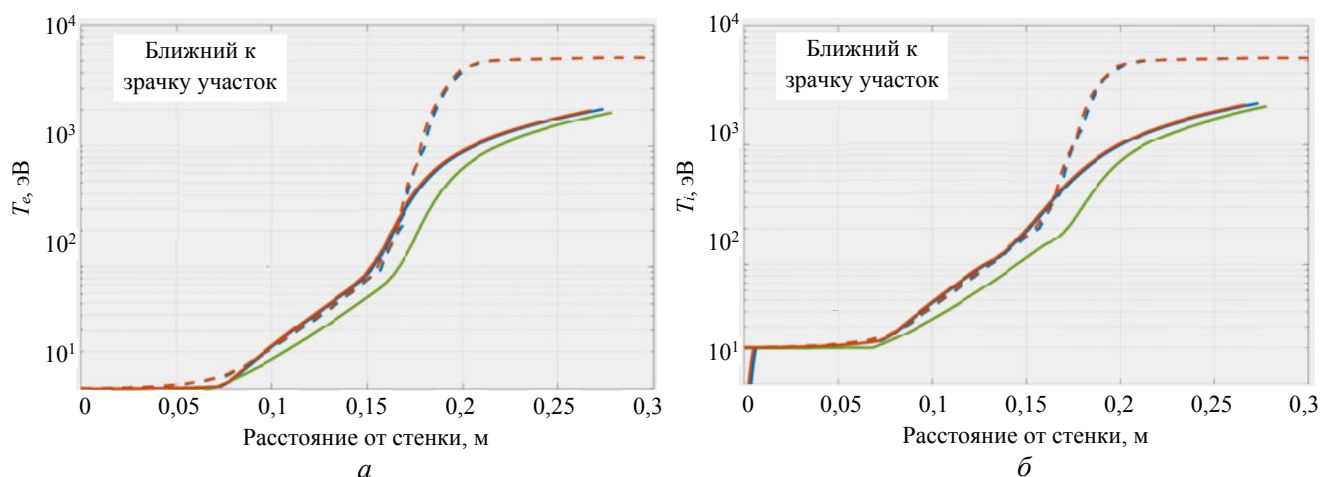


Рис. 6. Зависимость температуры электронов и ионов в различных расчётных сценариях от расстояния от стенки вдоль нормали к ней для ближнего к зрачку участка различных линий наблюдения: *a* — температура электронов; *b* — температура ионов; — для горизонтальной хорды; — для линии наблюдения los 1; — для линии наблюдения los 2; — расчётный сценарий «d»; - - - расчётный сценарий «1» ERO2.0

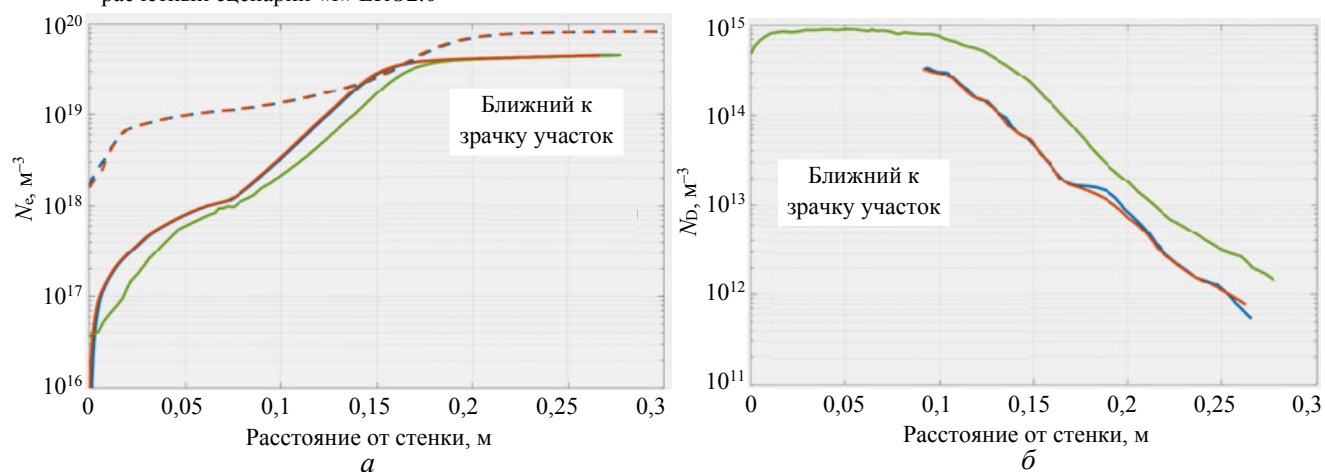


Рис. 7. Зависимость плотности электронов и нейтральных атомов дейтерия в различных расчётных сценариях от расстояния от стенки вдоль нормали к ней для ближнего к зрачку участка различных линий наблюдения: *a* — плотность электронов; *b* — плотность нейтральных атомов дейтерия; — для горизонтальной хорды; — для линии наблюдения los 1; — для линии наблюдения los 2; — расчётный сценарий «d»; - - - расчётный сценарий «1» ERO2.0

На рис. 8 показаны использованные в расчётах профили плотности иона бериллия Be V, полученные в результате моделирования [16] с помощью кода ERO2.0 [11] в расчётном сценарии «1».

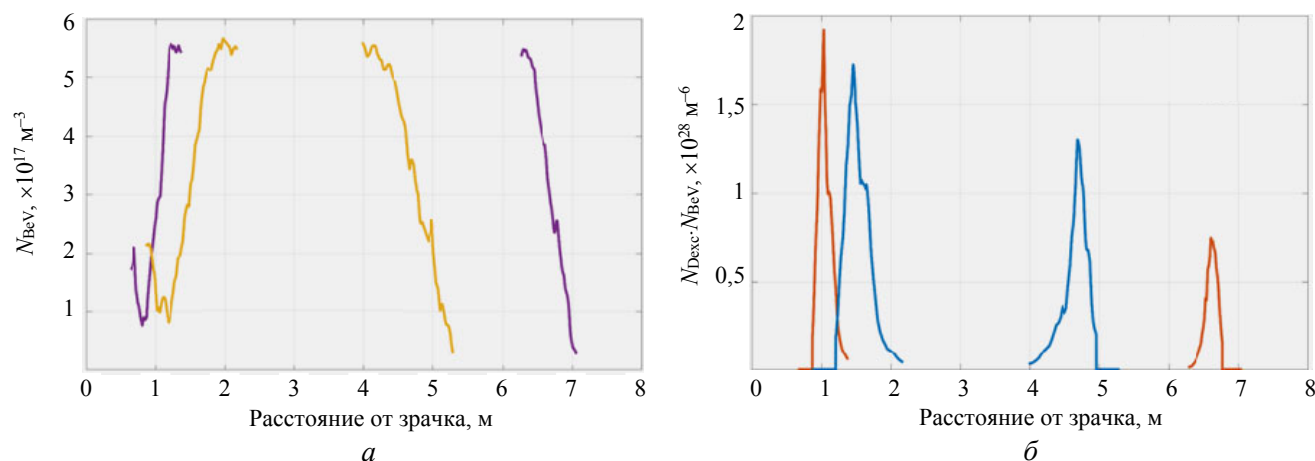


Рис. 8. Зависимость плотности иона бериллия Be V в расчётном сценарии «1» от расстояния от зрачка вдоль линий наблюдения los 1 (—) и los 2 (—) (а); зависимость произведения плотности нейтральных атомов дейтерия в первом возбуждённом состоянии и плотности иона бериллия Be V от расстояния от зрачка вдоль линий наблюдения los 1 (—) и los 2 (—) (б)

На всех рисунках показаны профили параметров плазмы только на участках хорд, попадающих в диапазон сетки численного моделирования кодом SOLPS, поскольку только они дают вклад в сигнал пассивной перезарядки.

Далее будет показано, что конечный результат зависит от произведения плотностей нейтральных атомов дейтерия и ионов бериллия Be V, причём главный вклад даёт перезарядка на атомах дейтерия в первом возбуждённом состоянии. На рис. 8, б видно, что максимум этого произведения находится в пределах рассматриваемых участков линий наблюдения.

Результаты предсказательного моделирования, представленные в этом разделе, являются входными данными для расчётов сигнала пассивной перезарядки.

СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИИ ПЕРЕЗАРЯДКИ

Хотя элементарные атомные процессы с участием бериллия достаточно подробно исследованы, ещё остаются типы процессов, для которых в интересующих диапазонах параметров базы данных недостаточно полны. Проведённый анализ литературы и баз данных показал, что таким процессом оказывается и интересующая нас перезарядка голых ядер бериллия на атомах водорода (и его изотопов), описываемая уравнением реакции (2). Необходимо отметить, что в литературе и в существующих базах данных (например, OPEN-ADAS [17], ALADDIN [18]) большая часть имеющейся информации о сечениях перезарядки охватывает диапазон энергий, интересных, в первую очередь, для расчётов активного сигнала, т.е. для диагностических пучков энергией десятки и сотни кэВ. В то же время для оценок сигнала пассивной перезарядки, когда энергия поступающих со стенки атомов-доноров электронов составляет десятки или сотни эВ, данных не хватает. Особенно это касается данных для сечения реакции, парциальных по орбитальному квантовому числу l захваченного электрона. Поэтому возникла необходимость проведения дополнительных расчётов [19] сечений для интересующих нас реакций перезарядки с помощью кода ARSENY [7].

Для сечения перезарядки голого иона бериллия на нейтральных атомах дейтерия в основном ($n_H = 1$) состоянии (2) при заселении уровней водородоподобного бериллия с главными квантовыми числами $n = 3$ и $n = 4$ при энергии столкновения $E < 1$ кэВ/а.е.м. использовались результаты расчётов [19], а при $E \geq 1$ кэВ/а.е.м. — данные [20, 21, 17], умноженные на такой коэффициент, чтобы при $E = 1$ кэВ/а.е.м. было совпадение с [19]. Для перезарядки на уровень с $n = 5$ использовались данные [20] при $E < 1$ кэВ/а.е.м. и данные [17] при $E \geq 1$ кэВ/а.е.м. Поскольку для $n = 6$ данных в [20] нет, при $E < 1$ кэВ/а.е.м. были

использованы данные [20] для $n = 5$, модифицированные таким образом, чтобы их масштаб согласовывался с данными [17] при $E \geq 1$ кэВ/а.е.м. (рис. 9).

Для перезарядки на нейтральных атомах дейтерия в первом возбуждённом ($n_H = 2$) состоянии при заселении уровней с главными квантовыми числами с $n = 3$ по $n = 8$ использовались данные [17]. При этом для перезарядки на уровни с $n = 5$ и $n = 6$ при энергии столкновения $E < 1$ кэВ/а.е.м. использовались результаты расчётов [19], при $E \geq 1$ кэВ/а.е.м. — данные [17], умноженные на такой коэффициент, чтобы при $E = 1$ кэВ/а.е.м. было совпадение с [19].

На рис. 9 и 10 представлен вид сечений реакции (2) для заселения на уровень с главным квантовым числом $n = 6$ в случае перезарядки на нейтральных атомах дейтерия в основном ($n_H = 1$) и первом возбуждённом ($n_H = 2$) состоянии соответственно.

Перезарядка (2) при $n = 6$ соответствует прямому заселению интересующего нас излучающего уровня и даёт главный вклад в его населённость. Как видно на рис. 9 и 10, в области малых энергий столкновения сечения перезарядки на возбуждённых атомах существенно (на несколько порядков) больше, чем на атомах в основном состоянии. Подобное соотношение согласуется с результатами [22, рис. 2].

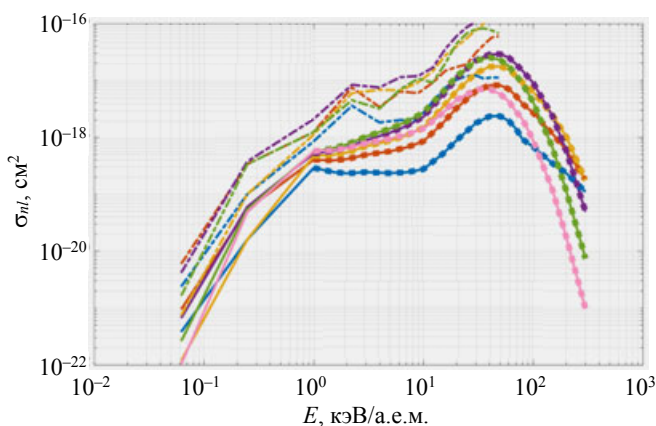


Рис. 9. Зависимость сечений реакции (2) при перезарядке ионов бериллия Be V на нейтральных атомах водорода в основном состоянии ($n_H = 1$) при заселении уровней с главным квантовым числом $n = 6$ и значениями орбитального квантового числа $l = 0$ (—), 1 (—), 2 (—), 3 (—), 4 (—), 5 (—): --- — данные [20] при $n = 5$; ... — данные [17]; — — комбинация данных [20] и [17], которая использовалась в данной статье

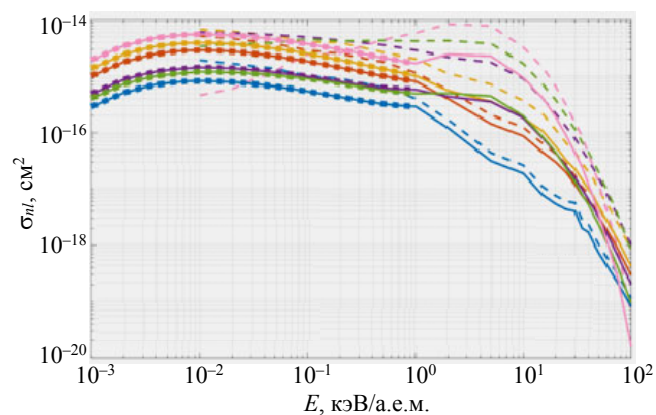


Рис. 10. То же, что на рис. 9, но при перезарядке на атомах водорода в возбуждённом состоянии ($n_H = 2$): ... — данные [19]; --- — данные [17]; — — комбинация данных [19] и [17], которая использовалась в данной статье

РАСЧЁТ СКОРОСТЕЙ РЕАКЦИИ ПЕРЕЗАРЯДКИ

Средняя скорость реакции перезарядки (1) рассчитывается следующим образом:

$$\langle v \sigma_{nl} \rangle \equiv \left\langle \langle v_{AB} \sigma_{nl} \rangle_{v_A} \right\rangle_{v_B} = \int d\mathbf{v}_A \int d\mathbf{v}_B f_A(\mathbf{v}_A) f_B(\mathbf{v}_B) v_{AB} \sigma_{nl}(v_{AB}), \quad (3)$$

где $\mathbf{v}_A$ — скорость ионов; $\mathbf{v}_B$ — скорость нейтральных атомов; $v_{AB} \equiv |\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B|$ — относительная скорость иона и нейтрального атома; $f_A(\mathbf{v}_A)$ — функция распределения ионов по скоростям (ФРС); $f_B(\mathbf{v}_B)$ — ФРС нейтральных атомов; σ_{nl} — сечение реакции перезарядки (1), зависящее только от относительной скорости v_{AB} ; n и l — главное и орбитальное квантовые числа того состояния, в которое захватывается электрон в результате перезарядки.

ФРС ионов предполагается максвелловской. ФРС нейтральных атомов, как известно, существенно отличается от максвелловской [23, 24]. Это, как показали расчёты кодом EIRENE [6] и приближенная полуаналитическая баллистическая модель [25—27], обусловлено существенным вкладом реакций перезарядки холодных нейтральных атомов водорода на горячих ионах водорода в процесс его рециклинга. Для сигналов пассивной перезарядки важны только интегральные характеристики немаксвелловской ФРС нейтральных атомов. Поэтому в данной работе будем использовать следующее приближение: в качестве ФРС нейтральных атомов возьмём квазимаксвелловскую ФРС с «эффективной температурой» T_{eff} (температура измеряется в энергетических единицах):

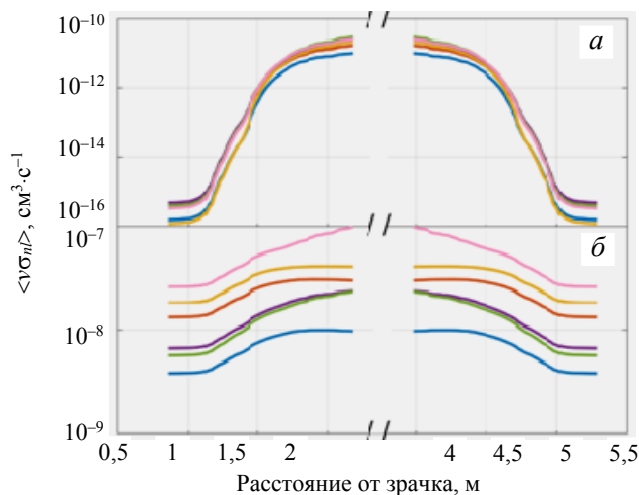


Рис. 11. Зависимость кинетической скорости перезарядки иона бериллия на атомах дейтерия в основном и первом возбужденном состояниях в расчётном сценарии «д» от расстояния от зрачка вдоль линии наблюдения los 1 при заселении уровня с главным квантовым числом $n = 6$ при значениях орбитального квантового числа $l = 0$ (—), 1 (—), 2 (—), 3 (—), 4 (—), 5 (—) для перезарядки на атомах дейтерия в основном состоянии ($n_H = 1$) (а), для перезарядки на атомах дейтерия в первом возбужденном состоянии ($n_H = 2$) (б)

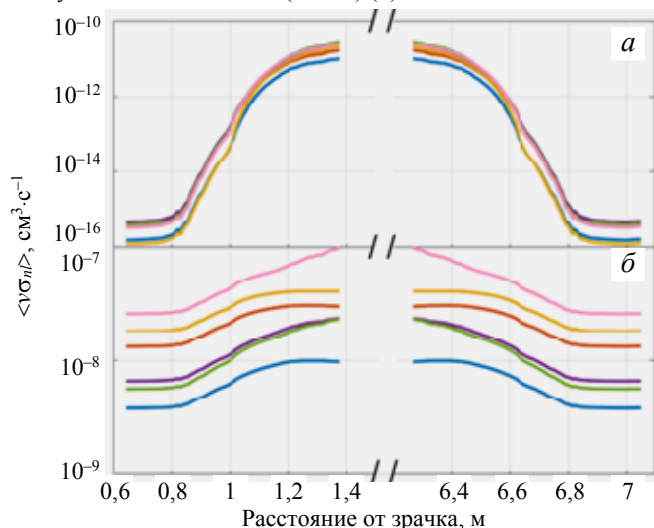


Рис. 12. То же, что на рис. 11, но для линии наблюдения los 2

РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭМИССИИ ФОТОНОВ И ОЦЕНКИ СИГНАЛА ПАССИВНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ

Для расчёта населённостей $f(n, l)$ атомных состояний в ионе Be IV, заселяемых перезарядкой атомов дейтерия на ионах Be V, использовался разработанный ранее численный код nl -KINRYD [9].

Решается уравнение для функции распределения $f(n, l)$ атомных электронов с источником перезарядки $q(n, l)$ атомов дейтерия на ионах Be V:

$$\left[\hat{L}_c + \hat{L}_c^q \right] f(n, l) + q(n, l) = 0, \quad (6)$$

где $\hat{L}_c$ — столкновительный оператор переходов атомного электрона между состояниями с различными квантовыми числами n, l при его столкновении с электронами плазмы; $\hat{L}_c^q$ — квантовый оператор радиационных переходов атомного электрона между атомными состояниями (n, l) ; $q(n, l) = \langle v\sigma_{CX} \rangle N_D$, где $\langle v\sigma_{CX} \rangle$ — скорость перезарядки для состояния n, l , cm^3/s ; N_D — плотность дейтерия, cm^{-3} .

$$T_{\text{eff}} = 2(\langle E_{\text{kin } \perp} \rangle + T_{\parallel})/3. \quad (4)$$

Здесь $T_{\parallel}$ — эффективная температура, соответствующая средней кинетической энергии компонента движения, параллельного стенке камеры; $\langle E_{\text{kin } \perp} \rangle$ — средняя кинетическая энергия компонента движения, перпендикулярного стенке камеры. В настоящее время не существует расчёта ФРС нейтральных атомов, разрешённого относительно проекций скорости параллельно стенке. Предварительный анализ кинетики рециклинга водорода в пристеночной плазме в духе баллистической модели [25—27], обобщённой на учёт компонента скорости, параллельного стенке, показывает, что в расчётах интегральных характеристик ФРС можно считать $T_{\perp} = T_{\parallel}$. Тогда с учётом соотношения $T_{\perp} = 2\langle E_{\text{kin } \perp} \rangle$ получаем

$$T_{\text{eff}} = 2\langle E_{\text{kin } \perp} \rangle = T_{\perp}. \quad (5)$$

Теперь, используя представленные ранее данные о профилях параметров плазмы и указанные данные о сечениях перезарядки, можно рассчитать средние скорости реакции перезарядки (3), (4). Для перезарядки на атомах дейтерия в основном ($n_H = 1$) состоянии были рассчитаны средние скорости перезарядки при заселении уровней с главными квантовыми числами с $n = 3$ по $n = 6$, для перезарядки на атомах дейтерия в первом возбужденном ($n_H = 2$) состоянии — при заселении уровней с главными квантовыми числами с $n = 3$ по $n = 8$. На рис. 11 и 12 представлены результаты расчётов скоростей перезарядки при заселении уровня с главным квантовым числом $n = 6$.

Тогда решение уравнения (6) описывает относительную плотность ионов в возбуждённом состоянии, а именно плотность возбуждённых ионов бериллия Be IV в состоянии с квантовыми числами n, l , делённую на плотность ионов бериллия Be V. Далее эта характеристика называется относительной населённостью излучающих атомных уровней в ионе Be IV.

На основании найденных населённостей были рассчитаны эффективные коэффициенты эмиссии k для спектральной линии Be IV для перехода $n = 6 \rightarrow 5$:

$$k = \sum_{l, l_0} f(n, l)(2l_0 + 1)W_{nl \rightarrow n_0 l_0}, \quad (7)$$

где $W_{nl \rightarrow n_0 l_0}$ — вероятность радиационного перехода электрона иона из состояния (n, l) в состояние (n_0, l_0) .

Спектрально-угловое распределение интенсивности излучения, приходящего в детектор, связано с эффективным коэффициентом эмиссии на один ион Be V, обозначаемым как $\frac{dN}{dt dN(\text{Be}(+4))} \left[\frac{\text{фотон}}{\text{с}} \right]$, таким соотношением

$$\frac{dN}{dt dS d\Omega_{\text{obs}} d\lambda} \left[\frac{\text{фотон}}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{стер} \cdot \text{нм}} \right] = \int_{\text{los}} \left\{ \frac{dN}{dt dN(\text{Be}(+4))} \right\} \frac{1}{4\pi} \frac{dN(\text{Be}(+4))}{dV} F_{\text{Gauss}}(\lambda - \lambda_0, T_i) dx. \quad (8)$$

Здесь интеграл берётся по длине хорды наблюдения (м), $\frac{dN(\text{Be}(+4))}{dV} \left[\frac{1}{\text{м}^3} \right]$ — плотность ионов бериллия, а спектральный контур линии задаётся в виде

$$F_{\text{Gauss}}(\lambda - \lambda_0, T_i) = \frac{1}{\lambda_0 [\text{нм}]} \sqrt{\frac{m_i c^2}{2\pi T_i}} \exp \left(-\frac{m_i c^2}{2T_i} \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \right)^2 \right), \quad (9)$$

где m_i — масса иона; T_i — температура ионов; λ — длина волны, нм; λ_0 — длина волны, соответствующая центру спектральной линии, нм.

Далее представлены рассчитанные по описанному алгоритму населённости (рис. 13), соответствующие им эффективные коэффициенты эмиссии (7) (рис. 14) и спектрально-угловые распределения интенсивности излучения (8) (рис. 15).

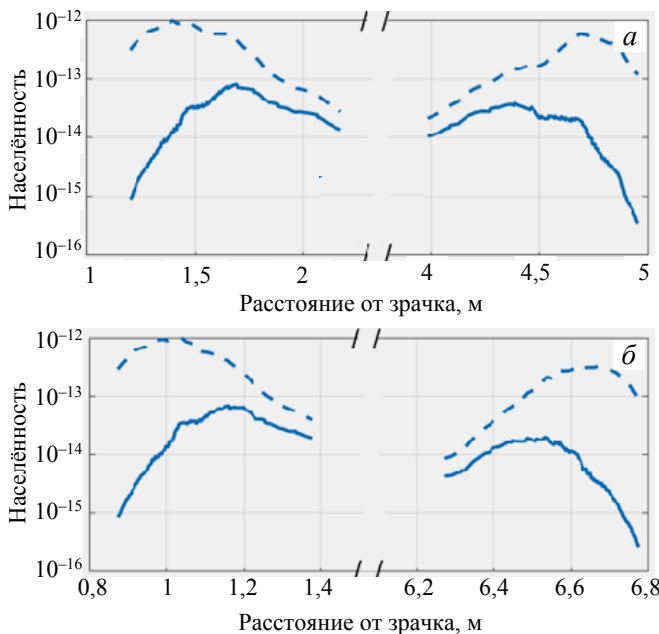


Рис. 13. Зависимость относительной населённости уровня $n = 6$ иона бериллия Be IV в расчётном сценарии «d» от расстояния от зрачка вдоль линий наблюдения: los 1 (a) и los 2 (б): вклад от перезарядки при $n_{\text{H}} = 1$ (—), при $n_{\text{H}} = 2$ (---)

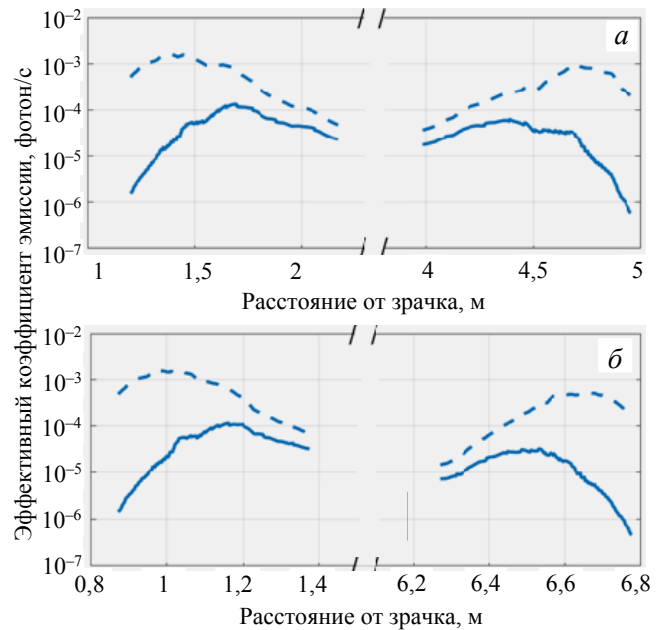


Рис. 14. Зависимость эффективных коэффициентов эмиссии (7) для перехода $n = 6 \rightarrow 5$ в ионе бериллия Be IV в расчётном сценарии «d» от расстояния от зрачка вдоль линий наблюдения los 1 (a) и los 2 (б): вклад от перезарядки при $n_{\text{H}} = 1$ (—), $n_{\text{H}} = 2$ (---)

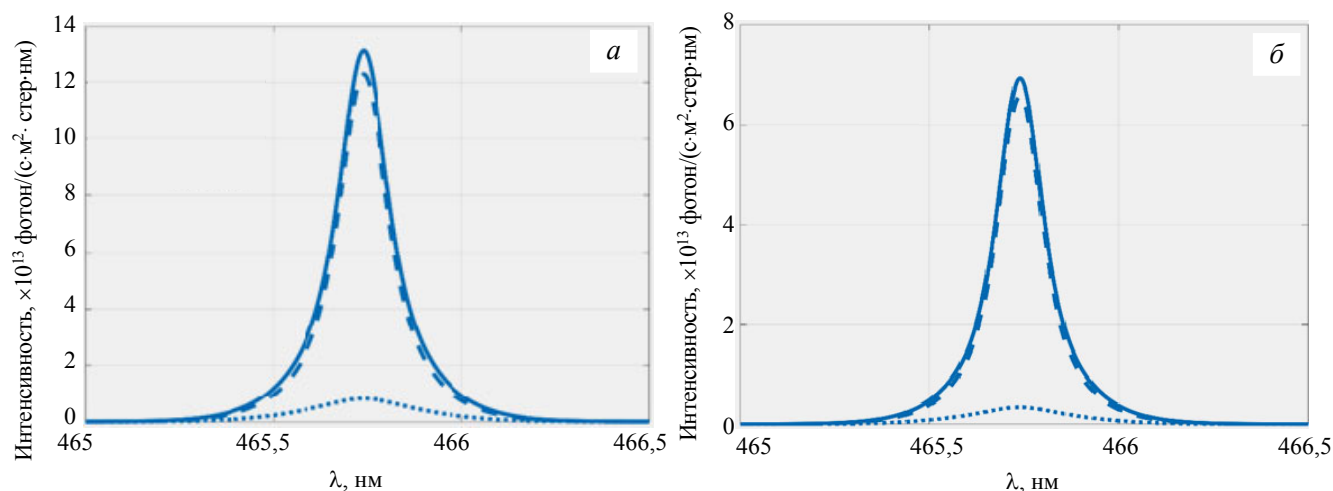


Рис. 15. Суммарное спектрально-угловое распределение (8) интенсивности фонового излучения от пассивной перезарядки, приходящего в детектор, для перехода $6 \rightarrow 5$ в ионе Be IV в расчётном сценарии «d» вдоль линий наблюдения los 1 (a), los 2 (б): вклад от перезарядки $n_H = 1$ (....), $n_H = 2$ (---), — — сумма

Важным компонентом работ по развитию синтетической диагностики для оптимизации процедуры определения параметров периферийной плазмы с помощью диагностики «Активная спектроскопия» по измерению спектров линий иона бериллия Be IV является исследование зависимости ожидаемых сигналов от вариации используемых данных для сечений перезарядки. Детальный анализ доступных в литературе данных был проведён в [28]. Отсутствие данных в интервале энергий, представляющем интерес для расчётов сигналов пассивной перезарядки, потребовало проведения расчётов, представленных в разделе «Сечения реакции перезарядки». Поэтому нами проведены расчёты сигналов пассивной перезарядки для сечений перезарядки, полученных путём «сшивки» данных расчётов кодом ARSENY при малых значениях энергии столкновения $E < 0,01$ кэВ/а.е.м. с данными из базы данных OPEN-ADAS [17] при больших энергиях. Результаты для спектральной интенсивности оказались примерно в 2 раза выше результатов на рис. 15.

Согласно результатам моделирования [2, 29] активный сигнал для рассматриваемой линии бериллия ожидается на уровне $\sim 10^{15}$ фотон/(с·м²·стер·нм) (рис. 3 в [2] и рис. 13 в [29]). Таким образом, активный сигнал превосходит фоновый сигнал пассивной перезарядки примерно на порядок величины. Это подтверждает, что для анализа условий достижения требуемой ИТЭР точности измерений, лежащей в интервале 10—30% для различных измеряемых параметров, необходим аккуратный расчёт сигнала пассивной перезарядки.

ВЫВОДЫ

Выполнены расчёты фонового излучения от пассивной перезарядки для линии водородоподобного иона бериллия Be IV, используемой для диагностики «Активная спектроскопия» в ИТЭР. Проведение расчётов потребовало создания комплексного алгоритма, в котором объединяются результаты различных методов предсказательного моделирования. Этот алгоритм охватывает широкий диапазон расчётно-теоретических моделей — от расчёта недостающих данных для характеристик элементарного процесса (перезарядки атомов дейтерия на водородоподобных ионах бериллия) до использования методов радиационно-столкновительной кинетики атомов и ионов и кинетики рециклинга водорода в пристеночной плазме. Так, расчёты учитывают процессы перезарядки водородоподобных ионов бериллия на нейтральных атомах дейтерия с немасвелловской функцией распределения атомов по скоростям, полученной в результате кинетических расчётов рециклинга изотопов водорода в пристеночной плазме. Расчёты проведены для одного из типичных расчётных сценариев работы дивертора ИТЭР с малой плотностью периферийной плазмы.

Показано, что вклад перезарядки водородоподобного иона бериллия на возбуждённых атомах водорода в состоянии с главным квантовым числом $n_H = 2$ существенно, более чем на порядок величины превышает вклад перезарядки на атомах водорода в основном состоянии. Показано также, что размер области периферийной плазмы, дающей основной вклад в сигнал пассивной перезарядки на хордах наблюдения диагностики «Активная спектроскопия», сильно зависит от профилей основных параметров периферийной плазмы: в режиме с малой плотностью нейтральных атомов дейтерия, т.е. в случае относительно слабого рециклинга, профиль светимости вдоль хорды наблюдения сосредоточен на длине несколько сантиметров на удалении от стенки на 15—20 см. Полученные результаты показывают, что для

анализа условий достижения требуемой ИТЭР точности измерений необходим аккуратный расчёт сигнала пассивной перезарядки. Поэтому развитый в настоящей работе подход к расчёту фонового сигнала, вызванного пассивной перезарядкой, следует использовать при оптимизации процедуры измерения полезного сигнала диагностикой «Активная спектроскопия» в токамаках, включая ИТЭР и Т-15МД.

Настоящая работа выполнена по договору № 17706413348200000600/230/6-20 от 29.05.2020 между ЧУ «ИТЭР-Центр» и НИЦ «Курчатовский институт» в рамках государственного контракта № н.4а.241.19.20.1042 от 21.04.2020 с Госкорпорацией «Росатом».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tugarinov S.N. et al. — Plasma Physics Reports, 2004, vol. 30, № 2, p. 128—135.
2. Серов С.В., Тугаринов С.Н., Von Hellermann M. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2018, т. 41, вып. 2, с. 89—94.
3. Sdvizhenskii P.A., Kukushkin A.B., Levashova M.G., Lisitsa V.S., Neverov V.S., Serov S.V., Tugarinov S.N. — In: Proc. 46th EPS Conference on Plasma Phys. Milan, Italy, 2019, ECA, vol. 43C, P4.1006; <http://ocs.ciemat.es/EPS2019ABS/pdf/P4.1006.pdf>.
4. Kukushkin A.S. et al. — Fusion Eng. Des., 2011, vol. 86, p. 2865.
5. Lisgo S.W. et al. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 415, p. 965.
6. Reiter D. et al. — Fusion Sci. Technol., 2005, vol. 47, p. 172.
7. Solov'ev E.A. — Workshop on Hidden Crossings in Ion-Collisions and in Other Nonadiabatic Transitions. Harvard Smithsonian Centre for Astrophysics, 1991.
8. Summers H.P. et al. — AIP Conf. Proc., 2007, vol. 901, p. 239—248.
9. Kadomtsev M.B., Levashova M.G., Lisitsa V.S. — JETP, 2008, vol. 106, p. 635—649.
10. Tugarinov S.N. et al. — In: 36th EPS Conf. Plasma Phys. Sofia, ECA, 2009, vol. 33E, P-5.214.
11. Romazanov J., Brezinsek S., Kirschner A., Borodin D., Eksaeva A., Pitts R., Lisgo S., Anand H., Veshchev E., Neverov V.S., Kukushkin A.B., Alekseev A.G., Linsmeier Ch. First Monte-Carlo modelling of global beryllium migration in ITER using ERO2.0. — Contributions to Plasma Physics, 2019. DOI: 10.1002/ctpp.201900149; <https://onlinelibrary.wiley.com>.
12. Lisgo S.W. Private Communications, 2012.
13. Braams B.J. — PhD Thesis. Rijksuniversitet Utrecht, 1986.
14. Kajita S. et al. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2013, vol. 55, p. 085020.
15. Kukushkin A.B., Neverov V.S., Alekseev A.G., Lisgo S.W., Kukushkin A.S. — Fusion Sci. Technol., 2016, vol. 69, p. 628.
16. Romazanov J. Private Communications, 2020.
17. OPEN-ADAS (Atomic Data and Analysis Structure); <http://open.adas.ac.uk/>.
18. ALADDIN Numerical Database Maintained by IAEA Atomic and Molecular Data Unit; <https://www-amdis.iaea.org/ALADDIN/>.
19. Tolstikhina I.Yu. Private Communications, 2020.
20. Errea L.F. et al. — Phys. Scr., 1996, vol. T62, p. 27.
21. Errea L.F. et al. — J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 1998, vol. 31, p. 3527.
22. Shimakura N., Kobayashi N., Honma M., Nakano T., Kubo H. — J. Phys. Conf. Series, 2009, p. 012045.
23. Мирнов С.В., Семенов И.Б. — Атомная энергия, 1970, т. 28, вып. 2, с. 120.
24. Reiter D. et al. — J. Nucl. Mater., 1992, vol. 196—198, p. 1059.
25. Kadomtsev M.B., Kotov V., Lisitsa V.S., Shurygin V.A. — In: Proc. 39th EPS Conf., 16th Intern. Congress on Plasma Physics. Stockholm, Sweden, 2—6 July 2012, P4.093.
26. Kadomtsev M.B. et al. — In: Proc. 40th EPS Conf. Espoo, Finland, 2013, P1.135.
27. Lisitsa V.S., Kadomtsev M.B., Kotov V., Neverov V.S., Shurygin V.A. — Atoms, 2014, vol. 2, p. 195—206.
28. Sdvizhenskii P.A., Lisitsa V.S., Kukushkin A.B., Tugarinov S.N. — International Review Atomic Molecular Physics, 2019, vol. 10 (2), p. 59—66.
29. Von Hellermann M., De Bock M., Marchuk O., Reiter D., Serov S., Walsh M. — Atoms, 2019, vol. 7, Issue 1, p. 30; <https://doi.org/10.3390/atoms7010030>.



Петр Александрович Сдви-
женский, н.с.; НИЦ «Курча-
товский институт», 123182
Москва, пл. Академика Кур-
чатова 1, Россия
Petr Sdvizhenskii
Sdvizgenskii_PA@nrcki.ru

Мария Германовна Левашова, с.н.с., к.ф.-м.н.; НИЦ «Кур-
чатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Кур-
чатова 1, Россия
Levashova_MG@nrcki.ru



Александр Борисович Кукушкин, в.н.с., д.ф.-м.н., профессор, лауреат премий им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Kukushkin_AB@nrcki.ru



Валерий Степанович Лисица, начальник лаборатории, д.ф.-м.н., профессор, лауреат премии им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Lisitsa_VS@nrcki.ru



Владислав Сергеевич Неверов, с.н.с., к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
neverov_vs@nrcki.ru



Юрий Андреевич Ромазанов, постдок, Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str., 52425 Jülich, Deutschland
j.romazanov@fz-juelich.de



Станислав Вадимович Серов, с.н.с.; Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Инга Юрьевна Толстихина, с.н.с., к.ф.-м.н.; Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, 119334 Москва, Ленинский пр-т 53с4, Россия
Inga-san@mail.ru



Сергей Николаевич Тугаринов, с.н.с.; Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия

Статья поступила в редакцию 11 июня 2020 г.

После доработки 28 августа 2020 г.

Принята к публикации 24 сентября 2020 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 4, с. 27—38.