

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Хуснутдинов Радмир Ильдарович

**Расчетно-теоретические модели
спектроскопической диагностики водорода и
бериллия в пристеночной плазме токамака**

Специальность 1.3.9 —
«Физика плазмы»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» и Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель **Кукушкин Александр Борисович**
д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт»

Официальные оппоненты:

Кавеева Елизавета Геннадьевна
д.ф.-м.н., профессор Высшей школы фундаментальных физических исследований, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург;

Майоров Сергей Алексеевич
д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории активных кулоновских систем, Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

Мухин Евгений Евгеньевич
к.ф.-м.н., заведующий лабораторией лазерной диагностики плазмы и взаимодействия плазмы с поверхностью, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 25 июня 2025 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета «*МИФИ.1.01*» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru/> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
МИФИ.1.01, к.ф.-м.н.,



Петрова Е.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Приток изотопов водорода из первой стенки в плазму представляет практический интерес для управляемого ядерного синтеза в водородной плазме с произвольной смесью изотопов водорода (H, D, T). Рециклинг водорода между первой стенкой и плазмой непосредственно влияет на профили параметров плазмы в периферийных областях и оказывает влияние на работу термоядерного реактора [1, 2]. Сложность кинетики рециклинга водорода между плазмой и первой стенкой, а также наличие сильного фонового излучения от рассеянного диверторного света (РДС) в основной камере [3] требуют применения спектроскопии высокого разрешения (СВР) и решения многопараметрических обратных задач для восстановления («измерения») требуемых параметров [3] (о роли рассеянного света см. также [4–6]). Расчет кинетики плазмы является сложной задачей, которая не может быть решена аналитически. В настоящее время наиболее точный прогноз параметров плазмы в пристеночном слое плазмы (Scrape-off Layer (SOL), СОЛ) токамака может быть получен с помощью численного моделирования. В случае ИТЭР часто используется численный код SOLPS (B2-EIRENE) по версии SOLPS4.3 [7–9] или современной версии SOLPS-ITER [10]. Код OEDGE [11] позволяет экстраполировать параметры плазмы от края исходной численной сетки SOLPS до первой стенки. Необходимые для оптической диагностики расчеты функции распределения по скоростям (ФРС) нейтральных атомов водорода выполняются методом Монте-Карло с помощью кинетического кода EIRENE [7], который входит в состав кода SOLPS, но получение ФРС со «спектроскопической» точностью (т.е. точностью, достаточной для спектроскопии высокого разрешения доплер-зеemanовского контура линии) требует автономного запуска при заданных гидродинамических параметрах плазмы (пространственных профилях плотности, температуры и др.). Все эти коды выполняют сложное численное моделирование и не могут быть использованы для восстановления параметров рециклинга водорода в реальном времени (т.е. в небольшом интервале времени, который, в частности, для демонстрационного токамака-реактора ИТЭР составляет около 100 мс).

Цель и задачи исследования

Целью работы является создание расчетно-теоретических моделей для спектроскопической диагностики водорода и основной примеси (на примере бериллия) в пристеночной плазме токамака и их

применение к практическим задачам в области управляемого термоядерного синтеза в устройствах магнитного удержания плазмы.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. развитие вычислительно-эффективной расчетно-теоретической баллистической модели кинетики рециклинга нейтральных атомов и молекул водорода в пристеночной плазме токамака, позволяющее использовать эту модель для спектроскопии высокого разрешения на хордах произвольного направления в основной вакуумной камере токамака;
2. создание программного модуля, реализующего вышеописанную модель, и ее использование для расчета двумерного по скоростям рециклинга атомов изотопов водорода и расчета распыления различных материалов первой стенки вакуумной камеры быстрыми перезарядочными атомами водорода в ИТЭР;
3. разработка расчетно-теоретической модели, которая позволит в режиме реального времени восстанавливать плотность потока атомов и молекул одного или двух изотопов водорода по спектральному контуру высокого разрешения линейчатого излучения атомов водорода и применение модели в задаче синтетической спектроскопической диагностики параметров водорода в пристеночной плазме ИТЭР;
4. развитие алгоритма восстановления пространственных профилей светимости по сигналам с видеокамер с учетом отражения света от стенок вакуумной камеры и наличия сильного рассеянного света из дивертора - двумерного профиля водорода по линии $H\alpha$ и трехмерного профиля примеси на примере бериллия по линии $Be\ I\ 457\text{ нм}$ и применение алгоритма для задачи синтетической спектроскопической диагностики параметров водорода и бериллия в пристеночной плазме ИТЭР.

Научная новизна работы

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана полуаналитическая модель рециклинга изотопов водорода, позволившая рассчитывать функцию распределения по скоростям нейтральных атомов и молекул водорода в пристеночном слое плазмы токамака на наклонных к первой стенке хордах наблюдения в камере токамака.
2. Впервые рассчитаны спектры высокого разрешения линейчатого излучения изотопов водорода на наклонных к первой

стенке хордах наблюдения в камере токамака ИТЭР для поставляемой Россией диагностики «Спектроскопия водородных линий в ИТЭР». Впервые рассчитано распыление различных материалов первой стенки быстрыми перезарядочными атомами водорода в пристеночной плазме ИТЭР.

3. Разработана модификация для водорода метода SXB для измерения плотности потока атомов примеси со стенки в плазму, которая использует асимметрию спектра высокого разрешения линейчатого излучения атомов изотопов водорода и способна заменить метод DXB в тех случаях, когда молекулярные спектры водорода не используются из-за сложности их интерпретации. Показана возможность быстрой оценки плотности потока изотопов водорода с первой стенки в пристеночную плазму ИТЭР по спектроскопии высокого разрешения.
4. Впервые показана возможность томографического восстановления двумерного профиля светимости водорода в линии $\text{H}\alpha$ и трехмерного профиля светимости примесей на примере бериллия в линии $\text{Be I } 457 \text{ нм}$ в пристеночном слое и диверторе токамака ИТЭР в рамках синтетической диагностики.

Положения, выносимые на защиту

1. Обобщение кинетической баллистической модели рециклинга нейтральных изотопов водорода на случай двумерной скорости атомов позволяет с помощью разработанного кода VM1D2V рассчитывать функцию распределения по скоростям атомов и молекул водорода в пристеночном слое плазмы токамака на хордах наблюдения.
2. Моделирование кодом VM1D2V кинетики атомов и молекул водорода в пристеночной плазме токамака позволяет рассчитывать спектральные контуры линейчатого излучения изотопов водорода на хордах наблюдения, наклонных к первой стенке, и распыление различных материалов первой стенки быстрыми перезарядочными атомами водорода.
3. Предложенная модификация метода SXB с включением кинетики рециклинга водорода и использованием асимметрии спектров высокого разрешения линейчатого излучения атомов изотопов водорода позволяет сделать экспресс-оценку в режиме реального времени плотности потока атомов изотопов водорода со стенки в плазму в токамаках-реакторах.
4. Разработанный метод на основе матриц переноса лучей обеспечивает возможность томографического восстановления дву-

мерного профиля светимости водорода в линии $H\alpha$ и трехмерного профиля светимости примесей на примере бериллия в линии $Be\ I\ 457\ \text{nm}$ в пристеночном слое и диверторе токамака ИТЭР в рамках синтетической диагностики «Спектроскопия водородных линий в ИТЭР».

Практическая и теоретическая ценность работы

Диссертационная работа выполнена в рамках расчетно-теоретической работы федеральной программы исследований по проблеме управляемого термоядерного синтеза (НИЦ «Курчатовский институт»).

1. Теоретическая значимость работы состоит в разработке новых расчетно-теоретических методов, необходимых для решения практических задач управляемого термоядерного синтеза, включая создание экспресс-методов и быстрых численных кодов (симуляторов сложных кодов из первых принципов) для использования в синтетических диагностиках и способных эффективно работать на действующей установке в режиме реального времени.
2. Восстановление профиля светимости и плотности потока нейтральных атомов изотопов водорода в пристеночной плазме является одной из основных задач поставляемой Российской Федерацией диагностики ITER Main Chamber H-alpha and Visible Spectroscopy («Спектроскопия водородных линий в ИТЭР») в Международном экспериментальном термоядерном реакторе-токамаке ИТЭР.
3. Методика и результаты расчетов спектров высокого разрешения линейчатого излучения изотопов водорода на наклонных к первой стенке хордах наблюдения в основной вакуумной камере ИТЭР включены в синтетическую диагностику для создания диагностики «Спектроскопия водородных линий в ИТЭР».
4. Предложенный метод быстрой оценки плотности потока изотопов водорода с первой стенки в пристеночную плазму может быть использован в рамках синтетической спектроскопической диагностики «Спектроскопия водородных линий в ИТЭР».
5. Алгоритм томографического восстановления профилей светимости плазмы может быть применен для нужд оптических диагностик плазмы в ИТЭР.

Личный вклад Постановка задач и интерпретация получен-

ных результатов предложены автором совместно с научным руководителем и соавторами опубликованных работ. Автором проделано подавляющее большинство аналитических и численных расчетов в работе.

Апробация работы

Результаты, изложенные в диссертации, были представлены в виде устных и стендовых докладов на следующих международных и всероссийских научных конференциях и семинарах:

1. Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии «ЛаПлаз» (2020, 2021, 2022, 2024 гг.);
2. Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (2020, 2021, 2022, 2023 гг.);
3. Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» (2021, 2023 гг.);
4. Международная конференция «Современные средства диагностики плазмы и их применение» (2018, 2020 гг.);
5. Международная конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью» (2021, 2024 гг.);
6. Научный семинар кафедры теоретической ядерной физики НИЯУ МИФИ (2023 г.);
7. Научный семинар «Теория магнитного удержания плазмы» ККТЭиПТ, НИЦ «Курчатовский институт» (2018–2024 гг.)

Публикации по теме

По материалам диссертации было опубликовано 22 печатные работы, среди них:

- 7 статей в изданиях, индексируемых в базах данных WoS (эти статьи также индексируются в базах данных Scopus и РИНЦ),
- 15 докладов в трудах международных и всероссийских конференций, индексируемых в РИНЦ,
- Итого 7 публикаций в изданиях из списка ВАК.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы научно-исследовательской работы, формулируются цели и задачи исследования, обосновывается научная новизна, практическая и теоретическая значимость полученных результатов, приводятся основные положения, выносимые автором на защиту.

В **первой главе** представлена разработка обобщения баллистической модели [12–14] на случай, двумерный по скорости атомов изотопов водорода. В разделе 1.1 описаны методы параметризации в кинетике и диагностике водорода в пристеночной плазме. Приведены основные физические процессы, моделируемые баллистической моделью, и ее входные параметры. В разделе 1.2 приведены основные формулы, использованные в обобщенной баллистической модели и реализованные в виде кода VM1D2V [A7, A11]. Приведены стационарное уравнение для атомов изотопов водорода (1) и стационарное уравнение для молекул (2). Представлены полуаналитическое решение (3), (4) данных уравнений и граничные условия, используемые при моделировании.

$$\begin{aligned}
v_x \frac{\partial f^{(a)}(\mathbf{v}, x)}{\partial x} &= q^{(a)}(\mathbf{v}, x) \\
&+ n_i^{(a)}(x) F_M^{(a^+)}(\mathbf{v}, T_i(x)) \sum_{b=D, T} \int d\mathbf{v}' \sigma_{cx}(|\mathbf{v} - \mathbf{v}'|) |\mathbf{v} - \mathbf{v}'| f^{(b)}(\mathbf{v}', x) \\
&- f^{(a)}(\mathbf{v}, x) n_e(x) \int d\mathbf{v}_e \sigma_{ai}(|\mathbf{v}_e|) |\mathbf{v}_e| F_M^{(e)}(\mathbf{v}_e, T_e(x)) \\
&- f^{(a)}(\mathbf{v}, x) \sum_{b=H, D, T} n_i^{(b)}(x) \int d\mathbf{v}_i \sigma_{cx}(|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}|) |\mathbf{v}_i - \mathbf{v}| F_M^{(b^+)}(\mathbf{v}_i, T_i(x))
\end{aligned} \tag{1}$$

$$v_x \frac{\partial f^{(ab)}(\mathbf{v}, x)}{\partial x} = -f^{(ab)}(\mathbf{v}, x) n_e(x) (\langle \sigma_{mi} v_e \rangle(x) + \langle \sigma_d v_e \rangle(x) + \langle \sigma_{di} v_e \rangle(x)) \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
f_n^{(j)}(v_x > 0, v_\perp, x) &= f_n^{(j)}(v_x, v_\perp, 0) \exp\left(-\frac{\varphi(0, x, v_x, v_\perp)}{v_x}\right) \\
&+ \frac{1}{v_x} \int_0^x dy \exp\left(-\frac{\varphi(y, x, v_x, v_\perp)}{v_x}\right) q^{(j)}(v_x, v_\perp, y) \\
&+ \frac{1}{v_x} \int_0^x dy \exp\left(-\frac{\varphi(y, x, v_x, v_\perp)}{v_x}\right) n_i^{(j)}(y) F_M^{(j)}(v_x, v_\perp, T_i(y)) \times \\
&\times \sum_{k=H, D, T} \int d\mathbf{v}' \sigma_{cx}(|\mathbf{v} - \mathbf{v}'|) |\mathbf{v} - \mathbf{v}'| f_{n-1}^{(k)}(v'_x, v'_\perp, y)
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
f_n^{(j)}(v_x < 0, v_\perp, x) &= \frac{1}{|v_x|} \int_0^x dy \exp\left(-\frac{\varphi(y, x, v_x, v_\perp)}{|v_x|}\right) q^{(j)}(v_x, v_\perp, y) \\
&+ \frac{1}{|v_x|} \int_0^x dy \exp\left(-\frac{\varphi(y, x, v_x, v_\perp)}{|v_x|}\right) n_i^{(j)}(y) F_M^{(j)}(v_x, v_\perp, T_i(y)) \times \\
&\times \sum_{k=H, D, T} \int d\mathbf{v}' \sigma_{cx}(|\mathbf{v} - \mathbf{v}'|) |\mathbf{v} - \mathbf{v}'| f_{n-1}^{(k)}(v'_x, v'_\perp, y)
\end{aligned} \tag{4}$$

Здесь $f^{(a)}(\mathbf{v}, x)$ – ФРС атомов a -го изотопа водорода ($a = \text{H}, \text{D}, \text{T}$) по проекции скорости на ось x . Другие функции в данных уравнениях обозначают следующие величины: $q^{(a)}(\mathbf{v}, x)$ – объёмный источник атомов вследствие диссоциации молекул и молекулярных ионов; $n_e(x)$ – плотность электронов; σ_{ai} – сечение ионизации; $n_i^{(a)}(x)$ и $T_i(x)$ – плотность ионов a -го изотопа водорода и температура ионов; σ_{cx} – сечение перезарядки атома водорода на ионе водорода, $F_M^{(a)}(\mathbf{v}, x)$ – максвелловская ФРС ионов a -го изотопа водорода, нормированная на единицу при интегрировании по скорости, $\varphi(y, x, v_x, v_\perp)$ – функция декремента, связанная с уходом атомов из-за ионизации и перезарядки между точками y и x .

На рисунке 1 приведен пример расчета двумерной ФРС атомов дейтерия в СОЛ в экваториальной плоскости токамака на стороне сильного магнитного поля в сценарии с низкой плотностью плазмы и бериллиевой первой стенкой, в зависимости от расстояния от стенки вакуумной камеры (указано в левом верхнем углу каждого графика). Здесь и далее V_{norm} – проекция скорости атомов на нормаль к первой стенке, направленную внутрь вакуумной камеры; V_{par} – модуль скорости атомов вдоль первой стенки.

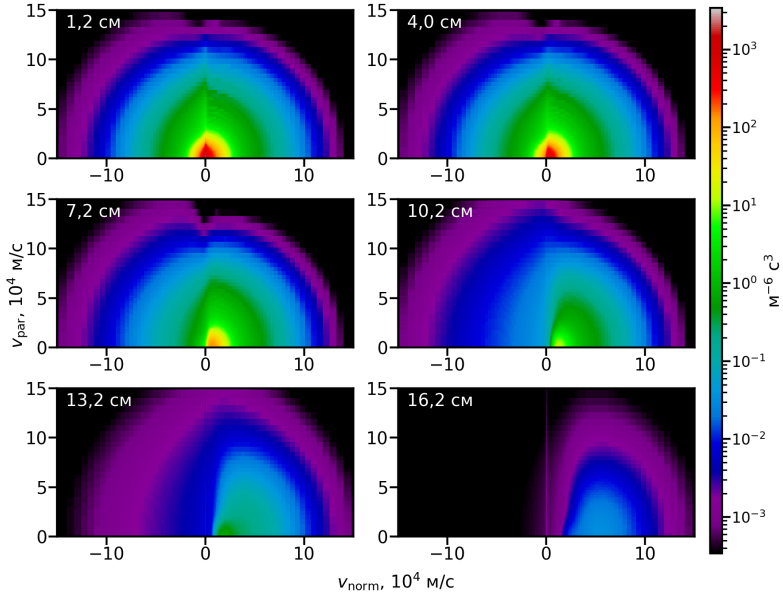


Рисунок 1 – Двумерная ФРС атомов дейтерия в СОЛ в зависимости от расстояния от стенки вакуумной камеры

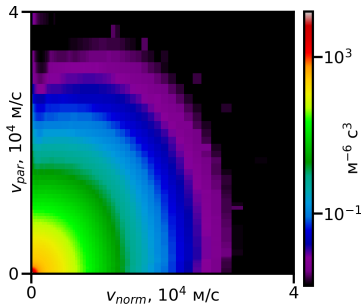


Рисунок 2 – Двумерная ФРС атомов дейтерия [A5, A7] и ФРС распыленных частиц бериллия

Результаты моделирования кодом VM1D2V представлены в разделе 1.3. Моделирование проводилось для двух вариантов (сценариев) пространственных распределений температуры и плотности плазмы в диверторе и пристеночной плазме ИТЭР, рассчитанных кодом SOLPS. Для этих сценариев были рассчитаны профили функции распределения по скоростям (ФРС) атомов дейтерия [A5, A7] и ФРС распыленных частиц стенки [A7, A20, A21, A22] в случаях с бериллиевой и вольфрамовой первой стенкой вакуумной камеры. Пример расчета двумерной ФРС распыленных частиц бериллия вблизи стенки на стороне сильного магнитного поля в сценарии с низкой плотностью плазмы приведен на рисунке 2.

Полученные результаты позволили впервые рассчитать спектральные контуры линии линейчатого излучения изотопов водорода на хордах наблюдения, направленных под различными углами к нормали к первой стенке (см. пример со спектрами в сценарии с низкой плотностью плазмы в СОЛ на рис. 3).

Вторая глава посвящена разработке экспресс-метода определения плотности потока атомов изотопов водорода со стенки в плазму на основе модификации известного метода SXB [15, 16] для примесей, которая использует спектральный контур высокого разрешения линейчатого излучения атомов водорода для адекватного учета кинетики рециклинга водорода, а именно, доминирующей роли создаваемых резонансной перезарядкой быстрых атомов водорода в распространении водорода со стенки в неоднородную плазму, что приводит к сильной немаксвелловости ФРС из-за резкой смены скорости и пространственного положения. В разделе 2.1 дано краткое описание метода SXB и его аналога для молекул DXB [17]. Раздел 2.2 посвящен модификации метода SXB для водорода [A1, A4], которая использует асимметрию

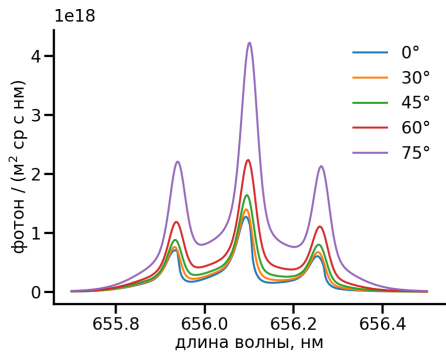


Рисунок 3 – Спектральный контур линии на хордах наблюдения

спектрального контура линии излучения атомов водорода вместо трудноинтерпретируемых молекулярных спектров. Приведен вывод указанной ниже системы уравнений (5), соответствующей данному методу, а также выполнена верификация модели в рамках синтетической диагностики путем сравнения результатов с результатами моделирования монте-карловским кинетическим кодом EIRENE [7] для пристеночной плазмы в двух указанных выше сценариях работы дивертора ИТЭР. Система (5) имеет вид:

$$\begin{cases} j_{wall_rec}(0)f_1(0) + j_{mol}(0)(\alpha + f_2(0)) = 4\pi \langle \frac{S}{XB} \rangle I_{32}, \\ j_{wall_rec}F_1 + j_{mol}(0)F_2 = \int I_{32}(\lambda) \frac{\lambda - \lambda_{32}}{\lambda_{32}} d\lambda, \end{cases} \quad (5)$$

где искомыми параметрами являются $j_{wall_rec}(0)$ – плотность потока таких атомов вблизи стенки, которые образованы при отражении ионов от стенки с мгновенной рекомбинацией ионов и $j_{mol}(0)$ – плотность потока молекул водорода со стенки, а входными параметрами являются $I_{32}(\lambda)$ – спектральный контур линии излучения в линии Бальмер-альфа и I_{32} – полная интенсивность излучения в этой линии на хорде наблюдения.

Раздел 2.3 посвящен обобщению полученного метода на случай двух топливных изотопов водорода, дейтерия и трития [A4, A16, A17]. Приведен вывод уравнений (6), (7), (8), соответствующих данному методу. Полученная система из пяти уравнений решается только в случае отсутствия паразитного сигнала РДС и выделения π -компоненты зеемановского расщепления. На рисунке 4 приведен пример используемого спектрального контура линии излучения атомами дейтерия и трития в линии Бальмер-альфа в сценарии 1 (см. [A4]) с низкой плотностью плазмы в СОЛ на стороне сильного поля на горизонтальной хорде наблюдения. Вертикальные пунктирные линии показывают длину волны линий Бальмер-альфа в состоянии покоя атома. Показана возможность восстановления плотностей потоков атомов и молекул изотопов водорода вместе с изотопным отношением путем решения обратной задачи для 6 различных сценариев работы дивертора ИТЭР (см. пример на рис. 5).

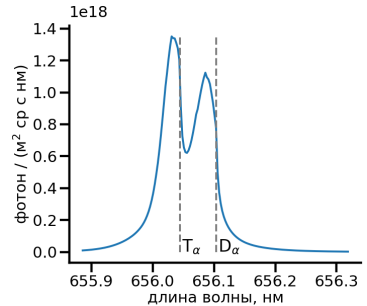


Рисунок 4 – Спектральный контур линии излучения атомами дейтерия и трития в линии Бальмер-альфа

$$j_x^{(D)}(0) + j_x^{(T)}(0) + \alpha j_x^{(DD)}(0) + \alpha j_x^{(DT)}(0) + \alpha j_x^{(TT)}(0) = 4\pi \left\langle \frac{S}{XB} \right\rangle I_{32} \quad (6)$$

$$\int I(\omega) \frac{\omega - \omega^{(a)}}{\omega^{(a)}} d\omega = \sum_{b=D,T} \int dx Q^{(1)}(x) \frac{j_x^{(b)}(x)}{c} + \sum_{b=D,T} (1 - \delta^{(ab)}) \frac{\omega^{(b)} - \omega^{(a)}}{\omega^{(a)}} \frac{1}{4\pi} \left\langle \frac{S}{XB} \right\rangle^{-1} \left(j_x^{(b)}(0) + \alpha j_x^{(bb)}(0) + \frac{1}{2} \alpha j_x^{(ab)}(0) \right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \int I(\omega) \left(\frac{\omega - \omega^{(a)}}{\omega^{(a)}} \right)^2 d\omega &= \sum_{b=D,T} \int dx Q^{(1)}(x) \frac{2 \langle E_{\text{kin}}^{(b)} \rangle(x)}{m^{(b)} c^2} + \\ &+ \sum_{b=D,T} (1 - \delta^{(ab)}) \frac{2(\omega^{(b)} - \omega^{(a)})}{\omega^{(b)}} \int dx Q^{(1)}(x) \frac{j_x^{(b)}(x)}{c} + \\ &+ \sum_{b=D,T} (1 - \delta^{(ab)}) \left(\frac{\omega^{(b)} - \omega^{(a)}}{\omega^{(b)}} \right)^2 \frac{1}{4\pi} \left\langle \frac{S}{XB} \right\rangle^{-1} \times \\ &\times \left(j_x^{(b)}(0) + \alpha j_x^{(bb)}(0) + \frac{1}{2} \alpha j_x^{(ab)}(0) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

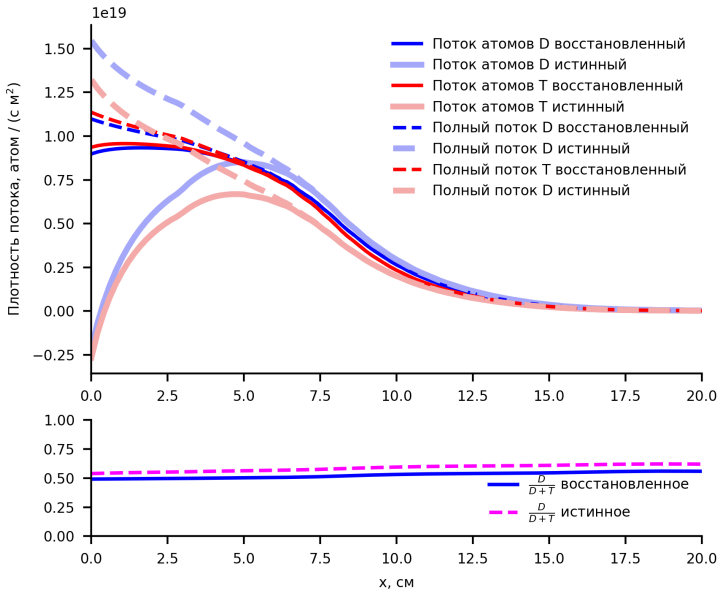


Рисунок 5 – Плотности потоков атомов на стороне сильного поля на горизонтальной хорде наблюдения как функции расстояния от первой стенки в сценарии 1 (см. [A4])

Третья глава посвящена задаче томографического восстановления профиля светимости водорода и бериллия в пристеночной плазме токамака ИТЭР. В разделе 3.1 рассмотрено восстановление двумерного тороидального аксиально-симметричного профиля светимости водорода в линии $H\alpha$. В подразделе 3.1.1 описан подход матриц переноса лучей [5], показана возможность его применения для моделирования сигнала в детекторах оптической диагностики, показана применимость подхода при решении обратной задачи [A2, A3, A6, A8-A10, A13, A19]. Построена карта тороидально симметричных источников света, которая учитывает сильную неоднородность светимости в диверторе, на который приходится большая часть излучаемой мощности [18]. Сами матрицы переноса лучей были рассчитаны с помощью библиотеки для трассировки лучей Raysect [19] и спектроскопической системы моделирования Cherab [20]. Для моделирования отражения от стенок использовалась модель двулучевой функции отражательной способности (BRDF) Кука-Торренса [21].

Построена карта тороидально симметричных источников света (рис. 6), которая учитывает сильную неоднородность светимости в диверторе, на который приходится большая часть излучаемой мощности. Сами матрицы переноса лучей были рассчитаны с помощью библиотеки для трассировки лучей Raysect и спектроскопической системы моделирования Cherab. Для моделирования отражения от стенок использовалась модель двулучевой функции отражательной способности (BRDF) Кука-Торренса [21].

Ход решения обратной задачи в случае водорода описан в подразделе 3.1.2. Исходные синтетические данные сигналов на видеокамерах и хордах наблюдения были получены с помощью прямой трассировки лучей кодом Raysect по данным светимости, смоделированным кодом SOLPS. На первом шаге обратной задачи светимость восстанавливается только в диверторе, пренебрегая светимостью в СОЛ. На втором шаге получен-

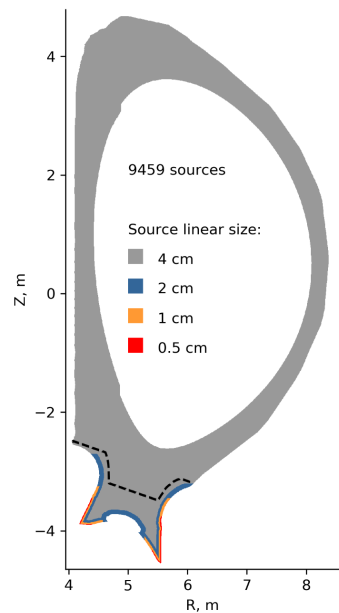


Рисунок 6 – Карта тороидально-симметричных источников света

ный профиль светимости в диверторе используется как начальное приближение в полной задаче восстановления профиля светимости в СОЛ и диверторе. Решение обратной задачи чувствительно не только к сильному РДС, но и выбору BRDF, что отражено в подразделе 3.1.3. Пример восстановления профиля светимости в случае с известным BRDF показан на рисунке 7 «д».

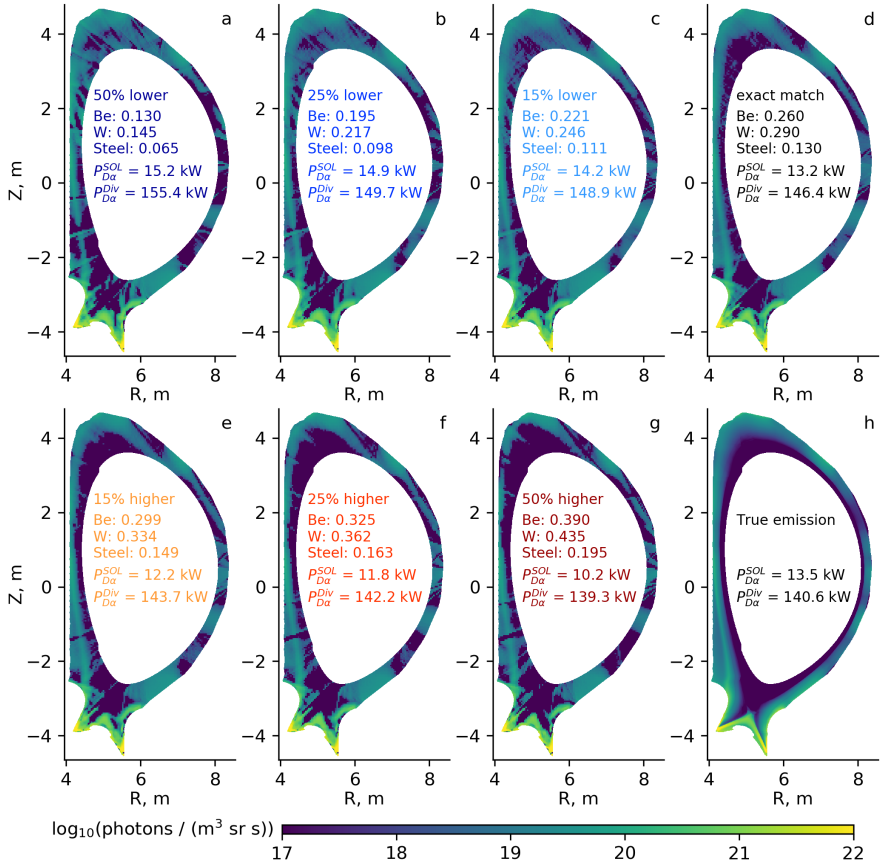


Рисунок 7 – Сравнение восстановленного профиля светимости $D\alpha$ с истинным в сценарии «о» (см. [A2]) при разном уровне отклонения предполагаемого значения параметра шероховатости от истинного значения

Рисунок 7 показывает, как различие первичного (т.е. известного по калибровочным измерениям в специальных разрядах) и варьи-

руемого (по причине возможного изменения в процессе экспериментов) вторичного значения безразмерного параметра шероховатости в модели Кука-Торренса влияет на восстановление профиля светимости. Первичное ("предполагаемое") значение параметра шероховатости используется при расчете матриц переноса лучей, а вторичное ("фактическое") – при расчете синтетического сигнала. Аналогичные расчеты были проведены для случаев с неизменным параметром шероховатости и альбедо, но с различным вкладом ламбертовских отражений. Показано, что при отношении полных мощностей светимости в линии $D\alpha$ в СОЛ ($P_{D\alpha}^{SO\!L}$) и в диверторе ($P_{D\alpha}^{Div}$) $P_{D\alpha}^{SO\!L}/P_{D\alpha}^{Div} > 0,06$ возможно восстановление профиля светимости.

Раздел 3.2 посвящен аналогичной задаче, но в случае бериллия (линия $Be\ I\ 457\ \text{нм}$). Как показано в подразделе 3.2.1, профили светимости были смоделированы кодом ERO2.0 [22]. Профили светимости в случае бериллия трехмерные, для них были рассчитаны матрицы переноса лучей, имеющие разную периодичность в отдельных участках пристеночной плазмы, связанную с периодичностью элементов первой стенки, что изложено в подразделе 3.2.2. Поскольку в диверторе нет мощных источников излучения в данной линии, то восстановление профиля светимости проходит в один шаг. Аналогично случаю водорода был произведен анализ чувствительности решения обратной задачи к выбору BRDF. Показано, что в случае бериллия изменение параметра шероховатости меньше влияет на точность восстановления профиля светимости. Аналогичные расчеты можно провести для других легких материалов стенки (например, бора, который планируется быть материалом напыленного слоя на вольфрамовой поверхности первой стенки в последней версии токамака ИТЭР).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные полученные в работе результаты можно сформулировать следующим образом.

1. Разработано обобщение кинетической баллистической модели рециклинга изотопов водорода в пристеночном слое плазмы токамака на случай двумерной скорости атомов и создана новая расчетная версия баллистической модели, код VM1D2V.
 - Обобщенная кинетическая модель позволяет рассчитывать функцию распределения по скоростям атомов и молекул водорода в пристеночном слое плазмы токамака на

- любых хордах наблюдения в основной вакуумной камере.
- Численная реализация кинетической модели является верифицированным быстрым симулятором численного кода EIRENE, монте-карловского кода из первых принципов.
2. Проведены расчеты кодом VM1D2V функции распределения по скоростям (ФРС) атомов изотопов водорода, спектров высокого разрешения их линейчатого излучения на наклонных к первой стенке хордах наблюдения в основной вакуумной камере ИТЭР. Проведены расчеты расширенной версией кода VM1D2V распыления различных материалов первой стенки быстрыми перезарядочными атомами водорода в пристеночной плазме в ИТЭР.
 - Методика и результаты расчетов спектров высокого разрешения линейчатого излучения изотопов водорода на наклонных к первой стенке хордах наблюдения в основной вакуумной камере ИТЭР включены в синтетическую диагностику для создания диагностики «Спектроскопия водородных линий в ИТЭР».
 - Расширение кода VM1D2V модулем расчета ФРС распыленных атомов материала первой стенки позволило рассчитывать скорость распыления различных материалов первой стенки быстрыми перезарядочными атомами водорода.
 3. Разработан алгоритм экспресс-метода (в режиме реального времени) определения плотности потока атомов изотопов водорода со стенки в плазму на основе модификации известного метода SXB для примесей, которая использует спектральный контур высокого разрешения линейчатого излучения атомов водорода для адекватного учета кинетики рециклинга водорода.
 - Разработана модель для одного изотопа водорода, которая использует асимметрию спектрального контура линии наряду с полной интенсивностью света в линии H α .
 - Модель была обобщена на случай двух изотопов, в нее был добавлен учет других интегральных характеристик спектрального контура линии.
 4. Проведена верификация алгоритма в рамках синтетической спектроскопической диагностики потока изотопов водорода со стенки в пристеночную плазму в ИТЭР.

- С помощью баллистической модели VM1D1V был произведен расчет спектрального контура линии на хорде наблюдения для двух сценариев с низкой и высокой плотностью плазмы в СОЛ, рассчитанных кодом SOLPS. Проанализирована точность восстановления плотностей потоков путем сравнения с входными данными для баллистической модели.
 - Показано, что в случае малости фона (отсутствия рассеянного диверторного света) и выделения π -компоненты зеemanовского расщепления модель позволяет оценить в режиме реального времени по порядку величины плотности потоков атомов и молекул двух изотопов водорода с первой стенки термоядерной установки и их изотопное отношение (топливное соотношение).
5. Получены результаты томографического восстановления пространственного двумерного профиля светимости водорода в линии $\text{H}\alpha$ и трехмерного профиля светимости бериллия в линии $\text{Be I } 457 \text{ нм}$ в пристеночном слое и диверторе токамака ИТЭР в рамках синтетической диагностики. Решение обратной задачи позволило провести фильтрацию (удаление) вклада отражений излучения от стенок вакуумной камеры из полного сигнала. В случае водорода показана возможность восстановления двумерного профиля светимости в сценариях с отношением полной мощности, излучаемой в СОЛ, к полной мощности, излучаемой в диверторе, превышающем 0,06.
 6. Разработан алгоритм анализа точности вышеуказанного томографического восстановления в зависимости от характеристик отражения излучения стенкой. Разработан алгоритм создания карты объемных источников света в пристеночной плазме и диверторе ИТЭР.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных WoS:

- [A1] Khusnutdinov R. I., Kukushkin A. B. Modification of SXB Method for Hydrogen in ITER Main Chamber // Physics of Atomic Nuclei. – 2019. – Vol. 82, no. 10. – P. 1392–1399.
- [A2] Development of a tomographic reconstruction method for axisymmetric

D α emission profiles in the ITER plasma boundary / Neverov V., Khusnutdinov R., Alekseev A., Carr M., De Bock M., Kukushkin A., Lovell J., Meakins A., Pitts R., Polevoi A., and Veshchev E. // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2020. – Vol. 62, no. 11. – 115014.

- [A3] Computer Tomography on Divertor Impurity Monitor for ITER with Minimizing Errors in a Logarithmic Scale / Natsume H., Kajita S., Neverov V. S., Khusnutdinov R. I., Veshchev E., Bock M. D., Polevoi A. R., Tanaka H., Ohno N., Ogawa H., and Kitazawa S. I. // Plasma and Fusion Research. – 2021. – Vol. 16. – 2405019
- [A4] Kukushkin A. B., Neverov V. S., Khusnutdinov R. I. Generalization of Modified SXB Method for Hydrogen to the Case of Isotope Mixture // Plasma Physics Reports. – 2023. – Vol. 49, no. 2 – P. 179–193.
- [A5] Effect of Thermodynamic Nonequilibrium of Hydrogen Recycling on the Charge-Exchange Spectroscopy of Tokamak Edge Plasma / Kukushkin A. B., Kukushkin A. S., Levashova M. G., Lisitsa V. S., Neverov V. S., Pshenov A. A., Sdvizhenskii P. A., Tolstikhina I. Y., Khusnutdinov R. I., Serov S. V., and Tugarinov S. N. // Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Vol. 86, no. 7. – P. 1640–1649.
- [A6] Assessing global beryllium erosion via tomographic reconstruction of 3D beryllium emission profiles in ITER / Neverov V. S., Pitts R. A., Khusnutdinov R. I., Alekseev A. G., Andreenko E. N., Carr M., Kocan M., De Bock M., Gorshkov A. V., Kozlov A. M., Kukushkin A. B., Lovell J., Meakins A., Morozov A. A., and Veshchev E. // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2024. – Vol. 66, no. 2. – 025010.
- [A7] Моделирование скорости распыления первой стенки токамака атомами изотопов водорода в пристеночной плазме / Р.И. Хуснутдинов, Н.Е. Ефимов, И.А. Никитин, Ю.М. Гаспарян и А.Б. Кукушкин // ВАНТ. Серия Термоядерный синтез. 2024. Т. 47, № 3. С. 117–128.

Публикации в сборниках конференций:

- [A8] Хуснутдинов Р.И., Кукушкин А.Б. Возможности модификации метода SXB для водорода в основной камере ИТЭР // Сборник тезисов докладов XI Международной конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение». 2018. С. 138–142.
- [A9] Хуснутдинов Р.И., Неверов В.С., Кукушкин А.Б. Алгоритмы

восстановления профилей светимости спектральных линий атомов и ионов в пристеночном слое ИТЭР с помощью томографии с учётом отражений света от первой стенки // Сборник тезисов докладов XII Международной конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение». 2020. С. 12–15.

- [A10] Восстановление двумерного профиля светимости $D\alpha$ в пристеночном слое и диверторе ИТЭР в рамках синтетической диагностики с использованием подхода матриц переноса лучей / Хуснутдинов Р.И., Неверов В.С., Вещев Е.А. и др. // Аннотации XLVII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. 2020.
- [A11] Восстановление двумерного профиля светимости $D\alpha$ в пристеночном слое и диверторе ИТЭР в рамках синтетической диагностики с использованием подхода матриц переноса лучей / Хуснутдинов Р.И., Неверов В.С., Вещев Е.А. и др. // Сборник аннотаций VI международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз 2020». 2020. С. 197–198.
- [A12] Хуснутдинов Р.И., Кукушкин А.Б., Неверов В.С. Баллистическая модель VM1D2V для рециклинга водорода в пристеночной плазме основной камеры токамака // Сборник научных трудов XXIV Международной конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». 2021. С. 14–17.
- [A13] Хуснутдинов Р.И., Кукушкин А.Б., Неверов В.С. Обобщение баллистической модели на двумерное распределение по скоростям атомов при рециклинге изотопов водорода в токамаке // Аннотации XLVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. 2021.
- [A14] Томографическая реконструкция трёхмерного профиля светимости бериллия в пристеночной плазме ИТЭР с учётом отражения света от первой стенки / Неверов В.С., Ромазанов Ю., Питтс Р.А., Хуснутдинов Р.И. и др. // Аннотации XLVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. 2021.
- [A15] Кукушкин А.Б., Неверов В.С., Хуснутдинов Р.И. Алгоритмы применения баллистической модели рециклинга водорода к диагностике плазмы токамака // Сборник научных трудов VII международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз 2021». Т. 1. 2021. С. 384–385.

- [A16] Неверов В.С., Хуснутдинов Р.И., Кукушкин А.Б. Развитие баллистической модели VM1D2V для моделирования спектра $H\alpha$ на хордах наблюдения в основной камере токамака // Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». 2021. С. 135–137.
- [A17] Кукушкин А.Б., Хуснутдинов Р.И. Метод быстрой оценки потока смеси изотопов водорода со стенки в плазму токамака по H-альфа спектроскопии // Аннотации XLIX Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. 2022. С. 78.
- [A18] Хуснутдинов Р.И., Кукушкин А.Б. Обобщение модифицированного метода SXB для водорода на случай смеси его изотопов // Сборник научных трудов VIII международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз 2022». 2022. С. 417.
- [A19] Быстрый расчет синтетических изображений для видеокамер ИТЭР с помощью интерполируемых матриц переноса лучей / Неверов В.С., Хуснутдинов Р.И., Полевой А.Р. и др. // Аннотации L Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. 2023. С. 300.
- [A20] Восстановление радиального профиля светимости линий атомов и ионов геликонной плазмы для прототипа безэлектродного плазменного ракетного двигателя методом матриц переноса лучей / Хуснутдинов Р.И., Шуровский Д.О., Нагель Н.Н. и др. // Тезисы докладов XX Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». 2021. С. 215–217.
- [A21] Хуснутдинов Р.И., Ефимов Н.Е., Гаспарян Ю.М., Кукушкин А.Б. Применение Баллистической модели VM1D2V для оценки распыления материала первой стенки термоядерной установки // Сборник научных трудов XXVII Международной конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». 2023. С. 53–56.
- [A22] Ефимов Н.Е., Хуснутдинов Р.И., Гаспарян Ю.М., Кукушкин А.Б. Оценка скорости распыления бериллиевой и вольфрамовой первой стенки токамака ИТЭР атомами изотопов водорода // Сборник научных трудов X международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз 2024». 2024. С. 178.

Список используемой литературы

- [1] Chapter 4: Power and particle control / A. Loarte, B. Lipschultz, A. Kukushkin et al. // Nuclear Fusion. 2007. Vol. 47, no. 6. P. S203–S263.
- [2] Chapter 7: Diagnostics / A. J. Donn e, A. E. Costley, R. Barnsley et al. // Nuclear Fusion. 2007. Vol. 47, no. 6. P. S337–S384.
- [3] Synthetic H-Alpha diagnostics for ITER: Inverse problems and error estimations for strong non-maxwellian effects and intense divertor stray light / A. B. Kukushkin, V. S. Neverov, A. G. Alekseev et al. // Fusion Science and Technology. 2016. Vol. 69, no. 3. P. 628–642.
- [4] Determination of divertor stray light in high-resolution main chamber H α spectroscopy in JET-ILW / V. S. Neverov, A. B. Kukushkin, M. F. Stamp et al. // Nuclear Fusion. 2017. Vol. 57, no. 1. p. 016031.
- [5] Usage of Ray Tracing Transfer Matrix to Mitigate the Stray Light for ITER Spectroscopy / S. Kajita, E. Veshchev, R. Barnsley et al. // Contributions to Plasma Physics. 2016. Vol. 56, no. 9. P. 837–845.
- [6] Effect of wall light reflection in ITER diagnostics / S. Kajita, M. H. Aumeunier, E. Yatsuka et al. // Nuclear Fusion. 2017. Vol. 57, no. 11. p. 116061.
- [7] Reiter D., Baelmans M., Börner P. The EIRENE and B2-EIRENE codes // Fusion Science and Technology. 2005. Vol. 47, no. 2. P. 172–286.
- [8] Analysis of performance of the optimized divertor in ITER / A. S. Kukushkin, H. D. Pacher, A. Loarte et al. // Nuclear Fusion. 2009. Vol. 49, no. 7. p. 75008. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0029-5515/49/7/075008>.
- [9] Finalizing the ITER divertor design: The key role of SOLPS modeling / A. Kukushkin, H. Pacher, V. Kotov et al. // Fusion Engineering and Design. 2011. dec. Vol. 86, no. 12. P. 2865–2873.
- [10] SOLPS-ITER modelling of ITER edge plasma with drifts and currents / E. Kaveeva, V. Rozhansky, I. Senichenkov et al. // Nuclear Fusion. 2020. Vol. 60, no. 4. p. 46019. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1741-4326/ab73c1>.

- [11] Design assessment of ITER port plug plasma facing material options / S. W. Lisgo, P. Börner, A. Kukushkin et al. // Journal of Nuclear Materials. 2011. Vol. 415, no. 1 SUPPL. P. S965–S968.
- [12] Ballistic model for neutral hydrogen distribution in ITER edge plasma / M. B. Kadomtsev, V. Kotov, V. S. Lisitsa et al. // 39th EPS Conference on Plasma Physics 2012, EPS 2012 and the 16th International Congress on Plasma Physics. Vol. 3. 2012. p. P4.093.
- [13] Kinetics of hydrogen atom radiation emission of the SOL plasma in ITER / M. B. Kadomtsev, V. Kotov, V. S. Lisitsa et al. // 40th EPS Conference on Plasma Physics, EPS 2013. Vol. 1. 2013. p. P1.135.
- [14] Ballistic model of recycling of atomic and molecular hydrogen and its application to the ITER main chamber / A. B. Kukushkin, A. S. Kukushkin, V. S. Lisitsa et al. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2021. Vol. 63, no. 3. p. 035025.
- [15] Behringer K. H. Spectroscopic studies of plasma-wall interaction and impurity behaviour in tokamaks // Journal of Nuclear Materials. 1987. Vol. 145-147. P. 145–153.
- [16] Determination of rate coefficients for fusion-relevant atoms and molecules by modelling and measurement in the boundary layer of TEXTOR / A. Pospieszczyk, D. Borodin, S. Brezinsek et al. // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 2010. Vol. 43, no. 14. p. 144017.
- [17] Hydrogen release from plasma-facing components into fusion plasmas - Recent results from a spectroscopic approach / P. Mertens, S. Brezinsek, P. T. Greenland et al. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2001. Vol. 43, no. 12A. P. A349–A373.
- [18] Influence of stray light on visible spectroscopy for the scrape-off layer in ITER / S. Kajita, E. Veshchev, S. Lisgo et al. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2013. Vol. 55, no. 8. p. 085020.
- [19] Meakins A., Carr M. raysect/source: v0.5.2 Release (Version v0.5.2). Zenodo. URL: <https://raysect.org>.
- [20] Description of complex viewing geometries of fusion tomography diagnostics by ray-tracing / M. Carr, A. Meakins, M. Bernert et al. // Review of Scientific Instruments. 2018. 08. Vol. 89, no. 8. p. 083506. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5031087>.

- [21] Cook R. L., Torrance K. E. A Reflectance Model for Computer Graphics // ACM Trans. Graph. New York, NY, USA, 1982. Vol. 1, no. 1. p. 7–24. URL: <https://doi.org/10.1145/357290.357293>.
- [22] Beryllium erosion and redeposition in ITER H, He and D–T discharges / J. Romazanov, A. Kirschner, S. Brezinsek et al. // Nuclear Fusion. 2022. Vol. 62, no. 3. p. 036011. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1741-4326/ac4776>.