

УДК 533.9.082

РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ “АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ” (CXRS) ДЛЯ УСТАНОВКИ TRT

© 2022 г. С. В. Серов^{а,*}, С. Н. Тугаринов^а, В. В. Серов^а, В. А. Крупин^б, И. А. Земцов^б,
А. В. Красильников^а, Н. В. Кузьмин^а, Г. С. Павлова^а, Н. Н. Науменко^с

^а Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”
“Проектный центр ИТЭР”, Москва, Россия

^б Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

^с Закрытое акционерное общество “Спектроскопия, оптика и лазеры – авангардные разработки”,
Минск, Республика Беларусь

*e-mail: s.serov@iterrf.ru

Поступила в редакцию 04.04.2022 г.

После доработки 02.06.2022 г.

Принята к публикации 02.06.2022 г.

TRT (Токамак с реакторными технологиями) будет следующим важным шагом в реализации российской национальной программы управляемого термоядерного синтеза. Установка TRT предназначена для отработки технологий обеспечения длительного рабочего импульса, что возможно при использовании высокотемпературной сверхпроводимости. Для управления работой установки TRT и контроля параметров термоядерной плазмы требуется разработка и создание целого комплекса диагностических систем. Одна из проектируемых диагностических систем для TRT – диагностика “Активная спектроскопия”, обозначаемая в англоязычной литературе аббревиатурой CXRS. Построение этой диагностики возможно как на нагревном, так и на диагностическом пучке атомов. В ее задачи будет входить измерение важнейших параметров плазмы, таких как ионная температура, скорость вращения плазмы, а также концентрация легких примесей по всему радиусу плазменного шнура. В данной работе представлена разработка диагностической системы “Активная спектроскопия” для установки TRT. Приведены оценки уровней активного и фонового сигнала, а также соотношения сигнал/шум. Представлены результаты моделирования спектральных профилей излучения из плазмы. По результатам моделирования предложена схема проведения измерений, учитывающая необходимость одновременной регистрации излучения из различных пространственных точек. Приведено описание предполагаемой системы сбора излучения из плазмы, а также описание предполагаемой измерительной аппаратуры. Сделана оценка точности измерения отдельных параметров плазмы и достижимого пространственного разрешения.

Ключевые слова: токамак TRT, диагностика высокотемпературной плазмы, активная спектроскопия, CXRS

DOI: 10.31857/S0367292122100262

1. ВВЕДЕНИЕ

Токамак с реакторными технологиями (Токамак with Reactor Technologies, TRT) [1] будет следующим, после токамака T-15 МД, важным шагом в реализации российской национальной программы управляемого термоядерного синтеза и создании проекта гибридного реактора. Установка TRT предназначена для отработки технологий обеспечения длительного рабочего импульса (свыше 100 с), что будет возможно благодаря использованию магнитной системы токамака на основе высокотемпературных сверхпроводников.

Основные проектные параметры установки TRT следующие: большой радиус $r = 2.15$ м, малый радиус $a = 0.57$ м, магнитное поле $B = 8$ Тл,

ток плазмы $I_p = 4–5$ МА, длительность импульса $t > 100$ с, средняя плотность электронов $n_e = 1–2 \times 10^{20}$ м⁻³, электронная и ионная температуры T_e и $T_i > 10$ кэВ.

Для управления работой установки TRT и контроля параметров термоядерной плазмы требуется разработка и создание целого комплекса диагностических систем. Одна из важнейших составляющих такого комплекса – активная спектроскопическая диагностика или активная спектроскопия (АС), обозначаемая в англоязычной литературе аббревиатурой CXRS (Charge eXchange Recombination Spectroscopy). Активная спектроскопия с использованием нагревного или диагностического пучка атомов широко исполь-

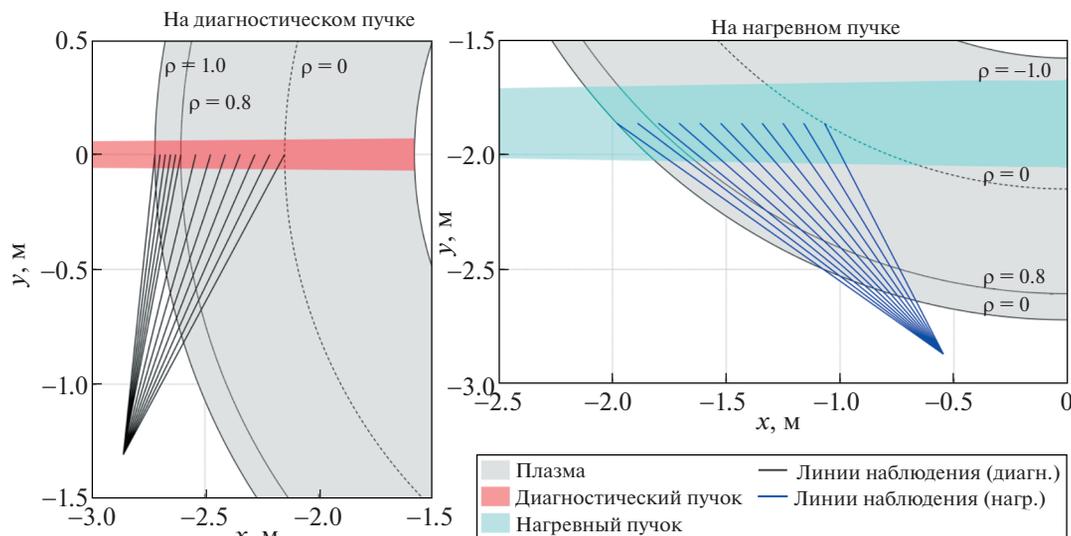


Рис. 1. Предлагаемые схемы расположения АС диагностики на диагностическом (рисунок слева) и нагревном (рисунок справа) пучках TRT (вид сверху).

зуется на всех современных токамаках, поскольку с ее помощью измеряются важные параметры плазмы, определяющие эффективность работы установки: ионная температура, концентрация легких примесей и скорость тороидального и полоидального вращения плазмы [2, 3].

Основная задача данной работы – разработка идеи активной спектроскопической диагностики для токамака TRT. Для этого было проведено моделирование работы этой диагностики для различных плазменных сценариев на установке. Рассматривались возможности построения активной спектроскопии как на нагревном пучке, так и на пучке специального диагностического инжектора.

По результатам моделирования были предложены схемы расположения элементов рассматриваемой диагностики в экваториальном патрубке TRT. Проработка оптической системы сбора излучения из плазмы и измерительной аппаратуры позволили получить оптимальное качество изображения и обеспечить хорошее пространственное разрешение для измерений.

2. АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НА ТОКАМАКЕ TRT

При проектировании активной спектроскопической диагностики для установки TRT был использован опыт создания аналогичной системы CXRS Edge для токамака ИТЭР [4, 5]. Основные принципы моделирования, построения системы сбора света, регистрации спектров и обработки данных, использовавшиеся для ИТЭР, оказались во многом применимы и для TRT.

На токамаке TRT планируется использование нагревных пучков, поэтому в первую очередь была рассмотрена возможность проведения CXRS измерений на водородном либо дейтериевом нагревном пучке. Затем была рассмотрена схема измерений с применением специального диагностического водородного инжектора. Эти две основные схемы изображены на рис. 1, поясняющем взаимное расположение плазменного шнура, пучка атомов и линий наблюдения.

Предполагалось, что первое зеркало будет расположено в соседнем с пучком экваториальном патрубке. Изображенные на рис. 1 линии сбора излучения начинаются на первом зеркале и пересекают пучок в точках с различным малым радиусом плазмы. Так как измерения с хорошим пространственным разрешением наиболее важны в приграничной области плазмы в районе наружного транспортного барьера (ЕТВ), то задачей было обеспечить пространственное разрешение порядка 10–20 мм на краю плазмы и порядка 40–50 мм в центре плазмы.

В качестве проектного значения для временного разрешения было выбрано значение 20 мс. Оно, с одной стороны, позволит накопить необходимый для измерений сигнал активной перезарядки, а с другой стороны позволит достаточно детально проследить изменение во времени пространственных распределений параметров плазмы при ее нагреве, оптимизации генерации тока и других переходных процессах. Кроме того, работа на частоте 50 Гц позволяет использовать существующие высокочувствительные черно-белые sCMOS камеры в системе регистрации.

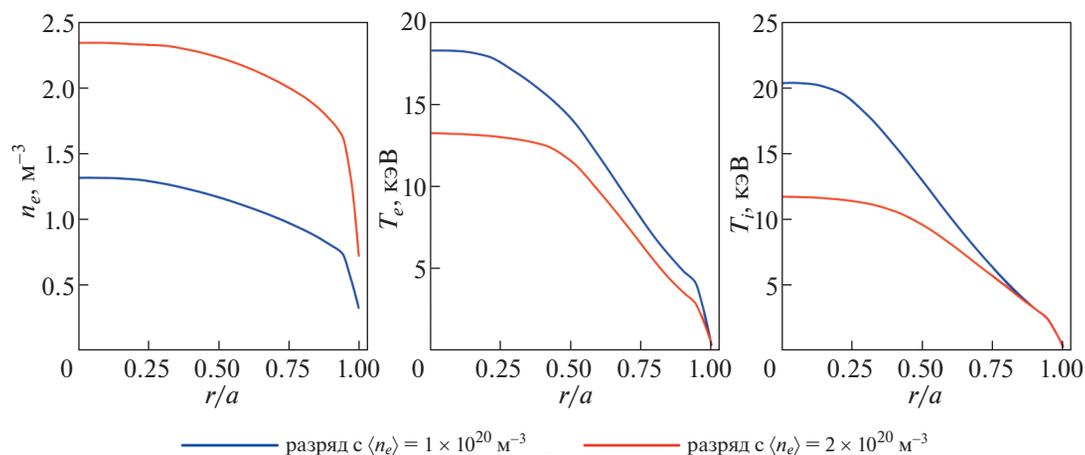


Рис. 2. Профили параметров плазмы для двух разрядов TRT, использованных для проектирования активной спектроскопической диагностики [7].

Общее пропускание системы сбора света предполагалось таким же, как и для ИТЭР – 5%.

Для регистрации спектров предполагалось использование спектрометра высокого разрешения (High Etendue Spectrometer или HES) на основе прозрачных голографических дифракционных решеток, разработанного для ИТЭР [6]. Он позволяет работать в трех спектральных каналах одновременно: “синем” (468 ± 5 нм), “зеленом” (527 ± 5 нм) и “красном” (656 ± 6 нм). Эта схема позволяет достичь высокого общего пропускания в 36, 34 и 25% для “синего”, “зеленого” и “красного” каналов соответственно. Использование оптики F/3 обеспечивает хорошую светосилу. Кроме того, прибор обладает хорошим спектральным разрешением порядка 0.02 нм и высокой дисперсией: 0.34 нм/мм для “синего” канала, 0.36 нм/мм для “зеленого” канала и 0.50 нм/мм для “красного” канала.

Применение трехканальной схемы позволяет проводить одновременные измерения спектров следующих линий.

Синий канал:

- Be IV (6–5) 465.8 нм,
- Be IV (8–6) 468.5 нм,
- He II (4–3) 468.5 нм;

Зеленый канал:

- Ar XVIII (16–15) 522.5 нм,
- Ne X (11–10) 524.9 нм,
- C VI (8–7) 529.1 нм;

Красный канал:

- H-альфа (3–2) 656.3 нм.

Размер области изображения прибора составляет 20×25 мм, что позволяет использовать входную щель высотой 20 мм. Для центральных областей плазмы (т.е. для спектров с наименьшей ин-

тенсивностью активного сигнала) предлагается использовать ширину входной щели 1 мм и на каждый спектрометр заводить излучение с двух пространственных каналов (по 10 мм высоты щели на канал). Для внешней же части плазменного шнура ($r/a > 0.8$) предполагается использование одного спектрометра для пяти пространственных каналов.

Проектирование активной спектроскопической диагностики для установки TRT проводилось для двух сценариев разряда из работы [7] с сильно различающимися плотностями плазмы:

- D–D-сценарий со средней плотностью $n_e = 1 \times 10^{20} \text{ M}^{-3}$, полем 8 Тл и током 5 МА;
- D–T-сценарий с высокой средней плотностью $n_e = 2 \times 10^{20} \text{ M}^{-3}$, полем 8 Тл и током 3 МА.

Профили электронной плотности n_e , электронной температуры T_e и ионной температуры T_i для этих сценариев изображены на рис. 2.

Профили плотности ионов рабочего газа и примесей считались подобными электронным, а значения плотности в центре плазмы ($r/a = 0.0$) были приняты следующие: $n_{D+T} = 0.78n_e$, $n_{He} = 0.04n_e$, $n_{Be} = 0.02n_e$, $n_C = 0.005n_e$, $n_{Ne} = 0.003n_e$. Данный компонентный состав соответствует эффективному заряду плазмы $Z_{eff} = 1.74$.

Были использованы параметры нагревного пучка из работы [8]. Отдельно рассматривались случаи водородного и дейтериевого пучка, так как они существенно отличаются по энергии атомов (500 и 250 кэВ/а.е.м. соответственно). Параметры водородного диагностического пучка были взяты из работы [9], описывающей диагностический пучок, разрабатываемый для токамака TRT. Основные параметры нагревных и диагностиче-

Таблица 1. Параметры высокоэнергетических пучков, использованные для моделирования работы активной спектроскопической диагностики на установке TRT

| Тип инжектора | Нагревный | | Диагностический |
|--|-----------|---------|------------------|
| | H | D | H |
| Используемые атомы | H | D | H |
| Энергия основной компоненты E_0 , кэВ/а. е. м. | 500 | 250 | 60 |
| Соотношение E_0 : $E_0/2$: $E_0/3$ (по мощности) | 1: 0: 0 | 1: 0: 0 | 0.78: 0.13: 0.09 |
| Эквивалентный ток в основной энергетической компоненте (на границе плазмы), А | 7 | 5.7 | 4.5 |
| Характерная плотность тока основной компоненты (на границе плазмы), мА/см ² | 10 | 8 | 45 |
| Расходимость, мрад | 33 | | 7 |
| Полуширина (FWHM) на границе плазмы, мм | 270 | | 100 |

ского пучков, использованные при проектировании системы, сведены в табл. 1.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Для оценки работоспособности схем построения диагностики, предложенных выше, было проведено моделирование соответствующих CXRS спектров. Для этого был применен код Simulation of Spectra [10], который используется для предсказания спектров АС исходя из параметров плазмы, геометрии измерений, параметров диагностического пучка, параметров оптической системы сбора света, а также технических характеристик спектрометра. Для моделирования используются атомные данные из пакета ADAS (Atomic Data and Analysis Structure) [11]. Следует отметить, что код неоднократно проверялся на действующих токамаках (JET [12], TEXTOR [13] и EAST [14]) и активно используется для моделирования работы диагностики АС на ИТЭР [5].

Код Simulation of Spectra вычисляет ослабление диагностического пучка на пути его движения через плазму. После этого вычисляется интенсивность линии активной перезарядки (ACX – Active Charge eXchange), возникающей вследствие перезарядки ядер рабочего газа и примесей на атомах пучка. При этом учитывается, что на интенсивность и форму линии активной перезарядки оказывает влияние зависимость сечения перезарядки от энергии (так называемый Cross-Section effect) [15], а также эффект гало [16]. Кроме того, код проводит расчет интенсивности и формы линии пассивной перезарядки (PCX – Passive Charge eXchange), возникающей вследствие перезарядки ядер рабочего газа на атомах водорода, находящихся на периферии плазмы [17, 18]. Также оценивается интенсивность пассивных линий излучения с границы, возникающих вследствие процесса возбуждения электронным ударом [19]. И, наконец, с помощью ин-

тегрирования интенсивности тормозного излучения вдоль линии наблюдения вычисляется уровень континуума.

Следует отметить, что при расчете не учитывалось отражение света от стенок камеры. Для грубой оценки можно воспользоваться результатом, полученным для активной спектроскопической диагностики ИТЭР [20]: присутствие отражений вызывает рост уровня континуума в спектрах примерно в 2 раза, что соответствует уменьшению соотношения сигнал/шум в 1.4 раза.

Для вычисления ошибок измерений к модельному спектру добавляется статистический шум. Это делается с помощью генератора случайных чисел с Гауссовой функцией распределения вероятностей. При этом ожидаемое значение соответствует числу отсчетов для каждого пикселя, а среднеквадратичное отклонение – квадратному корню из числа отсчетов.

Для линии активной перезарядки вычисляется соотношение сигнал/шум (SNR). Оно определяется как отношение количества отсчетов активного сигнала к уровню статистических шумов. Для оценки ошибок измерения параметров плазмы после построения модельного спектра имеется возможность провести его аппроксимацию (фиттинг) с использованием метода наименьших квадратов. По разбросам результатов фиттинга линии активной перезарядки оцениваются статистические ошибки определения параметров плазмы из спектра, которые берутся как размер 95% доверительных интервалов.

Моделирование проводилось для хорд наблюдения, пересекающих пучок в точках с различным малым радиусом ($\rho = r/a$). Область наблюдения варьировалась от границы плазмы ($\rho = 1.0$) со стороны слабого поля до центра ($\rho = 0.0$). Спектры были получены как для “синего”, так и для “зеленого” каналов спектрометра. Для каждого спектра вычислялось соотношение SNR и ошибки для следующих параметров: v_{Err} – для скоро-

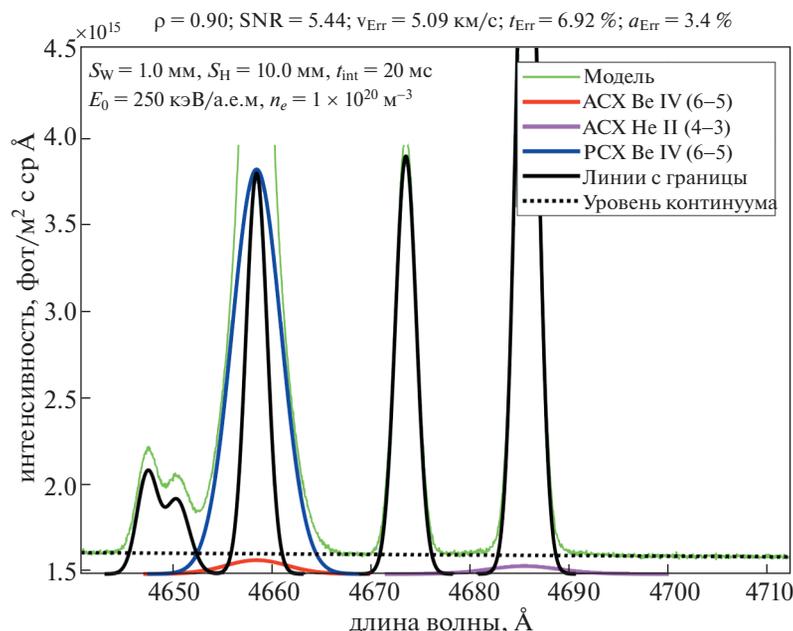


Рис. 3. Модельный профиль для “синей” области спектра, содержащей активные (ACX) и пассивные (PCX) линии гелия и бериллия. Получен для точки $r/a = 0.9$ и дейтериевого нагревного пучка для $n_e = 1 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

сти вращения, t_{Err} — для ионной температуры и a_{Err} — для амплитуды линии активной перезарядки. Ввиду ограниченности объема статьи приведем здесь некоторые характерные спектры, полученные в результате моделирования.

Спектральный профиль, полученный в результате моделирования работы активной спектроскопической диагностики на дейтериевом инжекторе с энергией 250 кэВ/а.е.м., изображен на рис. 3. Он смоделирован для “синего” канала спектрометра и содержит линии активной перезарядки гелия и бериллия. Спектральный профиль получен для точки с малым радиусом $r/a = 0.9$ для сценария со средней плотностью $n_e = 1 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Помимо линий активной перезарядки бериллия (красный цвет) и гелия (пурпурный цвет), в профиле присутствует выше упоминавшиеся линии пассивной перезарядки (синий цвет) и линии излучения с границы, обозначенные черным цветом (мультиплет C III: 4647, 4650 и 4651 Å; линии Be IV 4658 Å и Be II 4674 Å; линия He II 4686 Å). В силу специфики работы кода Simulation of Spectra, линия пассивной перезарядки считается только для одной из выбранных примесей (в данном случае для бериллия). Из-за вращения плазмы линии активной перезарядки получают смещенными относительно естественной длины волны перехода.

Видно, что даже в приграничной области плазмы сигнал активной перезарядки на нагревном

пучке получается достаточно слабым, и выделение соответствующих линий осложняется наличием ярких пассивных линий. Тем не менее измерения на границе плазмы возможны, о чем свидетельствует достаточное соотношение SNR (равное 5 для линии бериллия).

Спектр излучения из центра плазмы ($r/a = 0.0$), полученный для таких же условий, изображен на рис. 4. Видно, что проведение измерений в данном случае не представляется возможным, так как соотношение SNR для линии бериллия получается меньше единицы. Это объясняется тем, что, несмотря на большую энергию нагревного пучка, при прохождении через плазму наблюдается заметное его ослабление.

Подобные результаты удается получить и при моделировании спектров для “зеленого” канала спектрометра, содержащего линии активной перезарядки углерода и неона. При моделировании сценария со средней плотностью $n_e = 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ситуация оказывается хуже с точки зрения измерений, так как при такой плотности пучок к центру плазмы ослабевает еще сильнее.

Результаты моделирования работы активной спектроскопии на водородном нагревном инжекторе с энергией 500 кэВ/а.е.м. показывают, что при такой энергии измерения не представляются возможными даже на границе плазмы, не говоря уже о центральных областях. Это объясняется, главным образом, резким падением скоростных коэффициентов возбуждения наблюдаемых спектральных линий при энергии пучка более

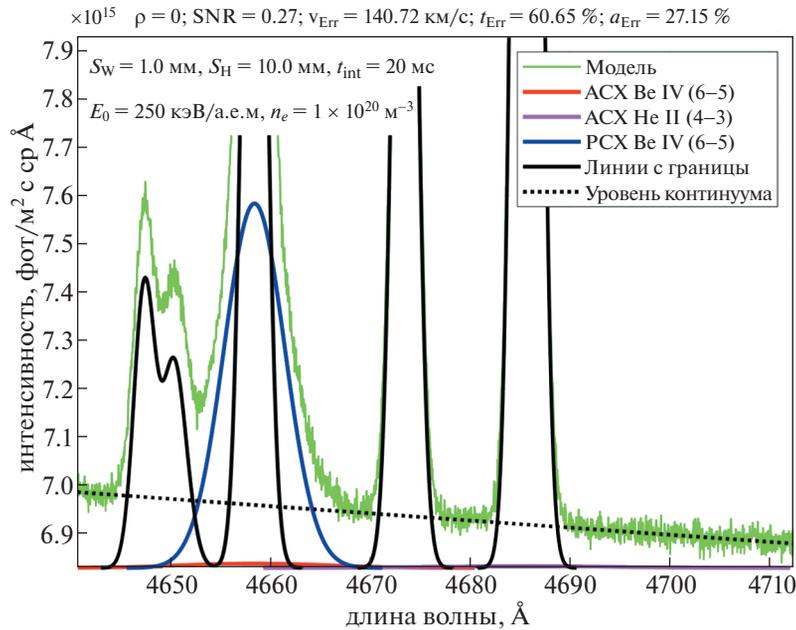


Рис. 4. Модельный профиль для “синей” области спектра, содержащей линии гелия и бериллия для точки $r/a = 0.0$ и дейтериевого нагревного пучка для $n_e = 1 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

100 кэВ/а.е.м. [21]. Таким образом, возможность проведения активных спектроскопических измерений на нагревных пучках TRT оказывается весьма ограниченной. Поэтому попытка создания CXRS-диагностики на нагревном пучке представляется нецелесообразной.

Теперь перейдем к результатам моделирования работы АС-диагностики на водородном диагностическом пучке. Два характерных спектральных профиля излучения, собранного из плазмы, представлены на рис. 5 и 6. Они смоделированы для разных каналов спектрометра (“синего” и “зеленого”), различных точек наблюдения (в центре плазмы и на середине малого радиуса плазмы) и для сценариев с различной плотностью плазмы.

Видно, что использование диагностического пучка позволяет уверенно производить измерения по всему внешнему малому радиусу плазмен-

ного шнура для сценария с плотностью плазмы $n_e = 1 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Для сценария с наибольшей ожидаемой плотностью плазмы измерения в центре усложняются. Чтобы более наглядно это проиллюстрировать, в табл. 2 представлены значения соотношения сигнал/шум (SNR) и погрешности измерения параметров плазмы, полученные по результатам фитинга модельных спектров для плотности плазмы $n_e = 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Отдельно была исследована зависимость соотношения сигнал/шум от энергии пучка с целью определения оптимальной энергии для измерений в центре плазменного шнура ($r/a = 0$). Результаты, полученные для двух разных сценариев с отличающейся плотностью, показаны на рис. 7.

Из него видно, что для меньшей плотности оптимальная энергия пучка лежит в диапазоне от 60 до 80 кэВ/а.е.м. в зависимости от примеси. Для большей же плотности оптимальная энергия пуч-

Таблица 2. Результаты моделирования точности измерения параметров плазмы для сценария с плотностью $n_e = 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ для АС на диагностическом пучке

| Канал | Синий (He II/Be IV) | | | Зеленый (C VI/Ne X) | | | |
|----------------------------------|---------------------|-----|-------|---------------------|-----|-------|---------|
| | r/a | 0.0 | 0.5 | 1.0 | 0.0 | 0.5 | 1.0 |
| SNR | | 2/4 | 32/60 | 600/850 | 1/3 | 20/40 | 400/620 |
| Погрешность измерения n_z , % | | 3/2 | <1 | <1 | 5/3 | <1 | <1 |
| Погрешность измерения T_i , % | | 4 | <1 | <1 | 8 | 1 | <1 |
| Погрешность измерения v , км/с | | 7 | 1 | <1 | 8 | 1 | <1 |

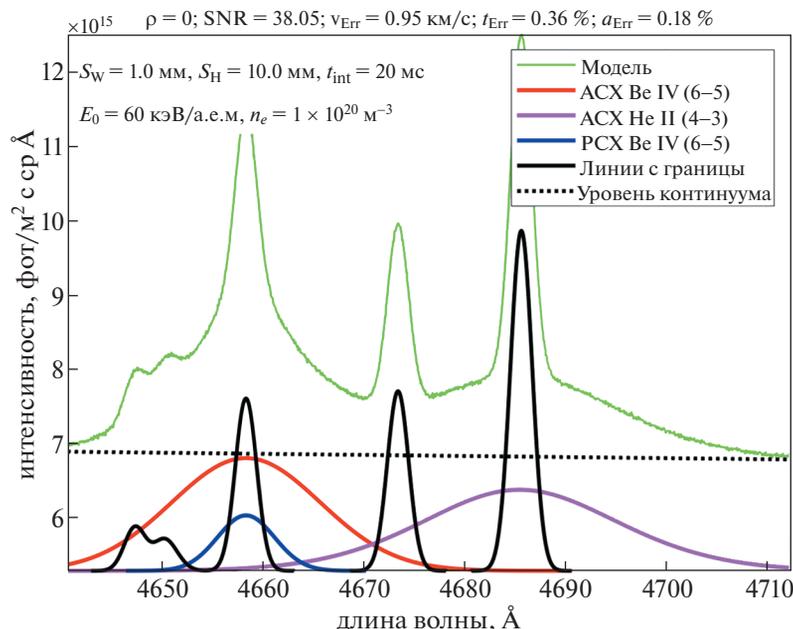


Рис. 5. Модельный профиль для “синей” области спектра, содержащей линии гелия и бериллия для АС на диагностическом пучке, $r/a = 0.0$ и $n_e = 1 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

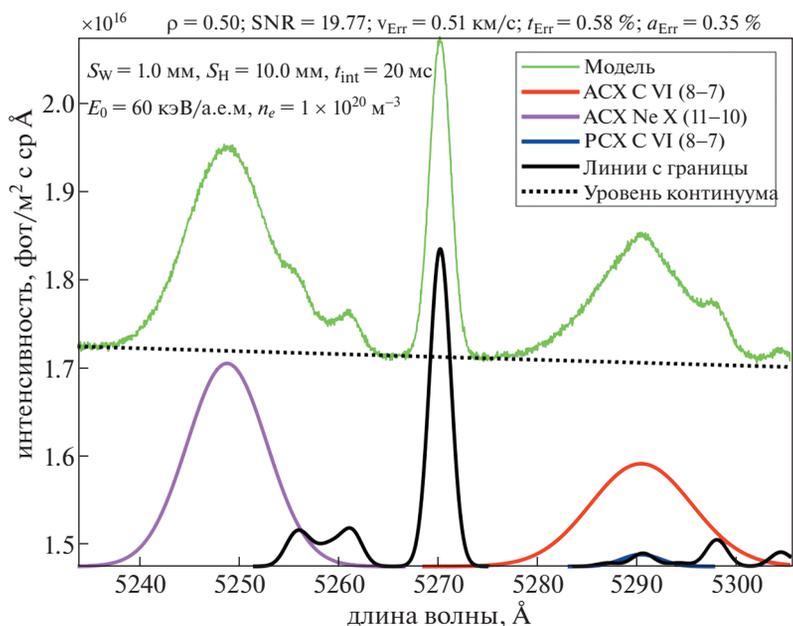


Рис. 6. Модельный профиль для “зеленой” области спектра, содержащей линии неона и углерода для АС на диагностическом пучке, $r/a = 0.5$ и $n_e = 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

ка меняется от 80 до 120 кэВ/а.е.м. Следует заметить, что при этом моделировании изменялась только энергия пучка, а остальные его параметры считались неизменными. В действительности же, при увеличении энергии будут ухудшаться другие важные параметры пучка, такие как доля атомов с

энергией E_0 , расходимость и плотность атомов в пучке. Кроме того, при изменении энергии в диапазоне 60–100 кэВ/а.е.м. интенсивность линий активной перезарядки (кроме линии Ne X) меняется незначительно. Поэтому для работы АС диагностики определяющим фактором является не

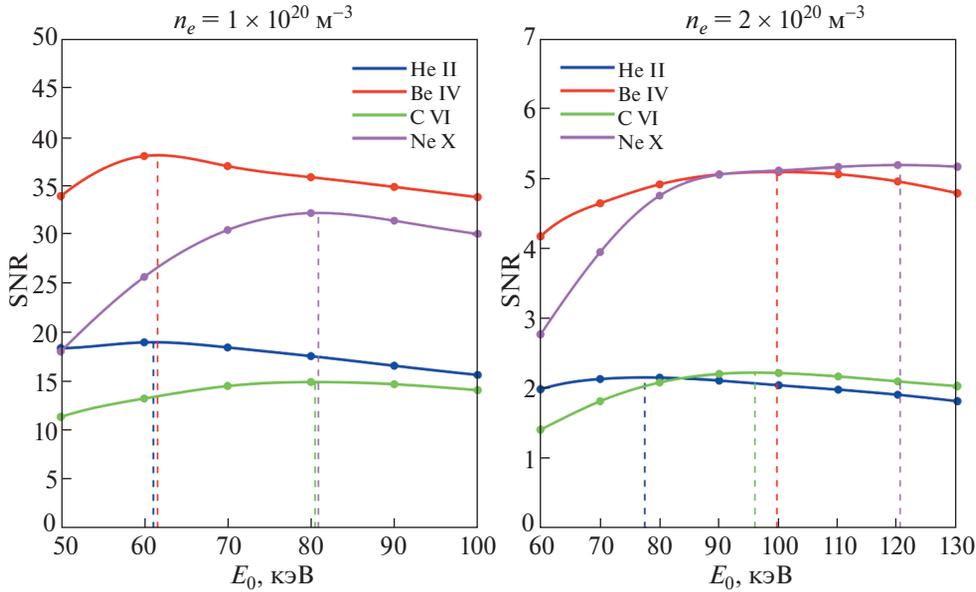


Рис. 7. Зависимость соотношения SNR от энергии пучка для измерений по линиям активной перезарядки различных примесей ($r/a = 0$) для плотностей $n_e = 1 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и $n_e = 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Вертикальными линиями отмечены точки максимума.

энергия основной компоненты инжектируемых частиц, а их плотность в пределах наблюдаемого участка пучка, так как интенсивность линии активной перезарядки напрямую зависит от плотности инжектируемых атомов.

Был исследован еще один важный фактор – геометрические ограничения на пространственное разрешение диагностики. Ограничения возникают из-за того, что хорды наблюдения не обязательно пересекают пучок вдоль магнитных по-

верхностей. Тогда при регистрации света вдоль линии наблюдения на спектрометр попадает излучение из точек с разным малым радиусом плазмы.

Чтобы оценить пространственное разрешение, соответствующее расположению хорд наблюдения на рис. 1, было проведено моделирование с использованием кода Simulation of Spectra. При этом учитывался также и эффект гало [16], ухудшающий пространственное разрешение. Результаты моделирования для нагревного и диагностического пучков показаны на рис. 8.

Видно, что пространственное разрешение для измерений на диагностическом пучке соответствует указанным выше требованиям (10 мм на границе плазмы и 50 мм в центре плазмы). При измерениях на нагревном пучке с использованием одной системы сбора света (см. рис. 1) уложиться в требования по пространственному разрешению не получается. Таким образом, необходимость получения хорошего пространственного разрешения является еще одним аргументом в пользу создания активной спектроскопической диагностики на диагностическом пучке.

4. ПРЕДЛАГАЕМАЯ СХЕМА РАСПОЛОЖЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ АС

После проведения моделирования спектров схема построения АС диагностики на диагностическом пучке была проработана более детально. Для вывода излучения из плазмы была спроекти-

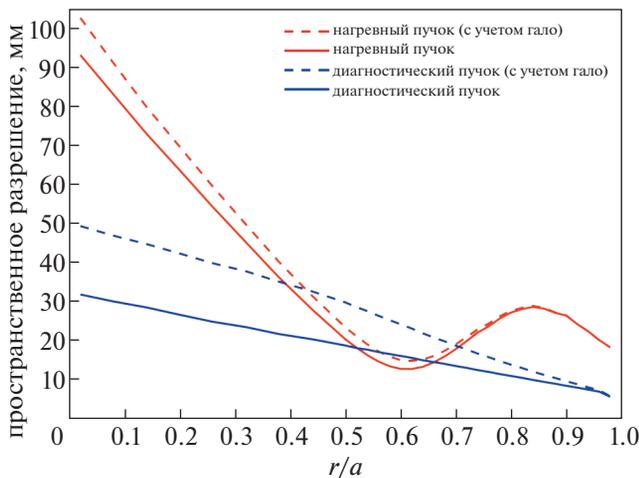


Рис. 8. Геометрическое пространственное разрешение для измерений на нагревном и диагностическом пучках с учетом и без учета эффекта гало.

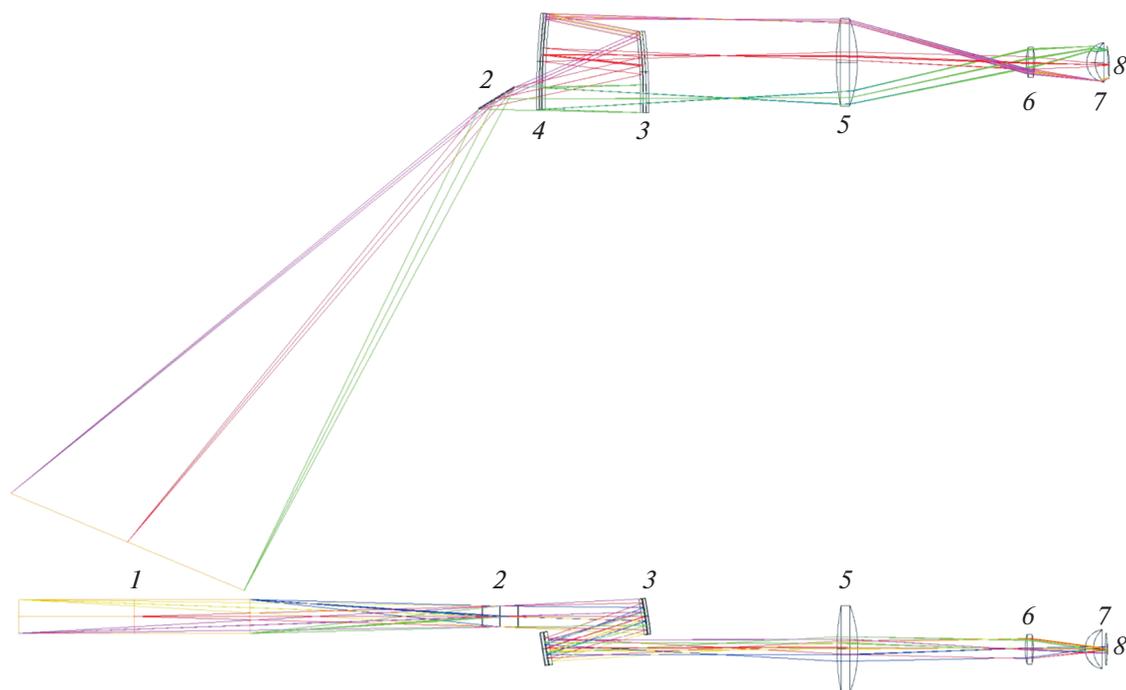


Рис. 9. Оптическая схема АС диагностики в экваториальном патрубке TRT, вид сверху (верхний рисунок) и вид сбоку (нижний рисунок): 1 – область прохождения диагностического пучка через плазму; 2 – первое зеркало; 3, 4 – сферические зеркала; 5, 6, 7 – линзы; 8 – плоскость изображения.

рована оптическая система, которая строит изображение необходимого участка диагностического пучка в заданном масштабе. Из плоскости изображения излучение передается на входные щели спектрометров с использованием оптоволоконного коллектора.

Основные требования к оптической системе были следующие:

- соответствие выходного телесного угла светосиле спектрометра ($F/3$);
- увеличение системы – 10, чтобы половина высоты входной щели спектрометра (10 мм) соответствовала полуширине пучка в плазме (100 мм);
- пространственное разрешение – 10 мм на границе плазмы и 50 мм в центре.

Этими требованиями определяется размер входной апертуры (первого зеркала) – 50 мм. На основе этих требований была разработана оптическая схема построения изображения исследуемого участка плазмы, представленная на рис. 9.

Свет излучается из области прохождения диагностического пучка через плазму 1. С помощью плоского первого зеркала 2 и сферических зеркал 3, 4 излучение направляется на систему из трех линз 5, 6 и 7, строящих изображение пучка в плоскости изображения 8, находящейся справа от последней линзы. Расположение этих оптических элементов в экваториальном патрубке TRT

представлено на рис. 10. Также там показаны возможные хорды для проведения наблюдений из верхнего патрубка установки, которые предполагается использовать для измерения скорости полоидального вращения на краю плазмы. На данном этапе моделирование для системы наблюдения в верхнем патрубке установки TRT не проводилось, так как количество активного сигнала на краю плазмы заведомо будет достаточным для проведения измерений.

Для удовлетворения основным требованиям оптическая схема была оптимизирована с использованием программного обеспечения ZEMAX [22] для широкого диапазона длин волн (468–656 нм). Рассчитанные параметры оптических элементов приведены в табл. 3.

Все оптические элементы получились достаточно компактными и технологичными. Опыт разработки диагностики АС для ИТЭР показывает, что изготовление соответствующих линз из кварцевого стекла и зеркал не составит большой проблемы. Величина пространственного разрешения, которую позволяет получить оптимизированная оптическая система, приведена в табл. 4.

Видно, что пространственное разрешение предлагаемой оптической системы с запасом соответствует заложенным требованиям (10 мм на границе плазмы и 50 мм в центре плазмы).

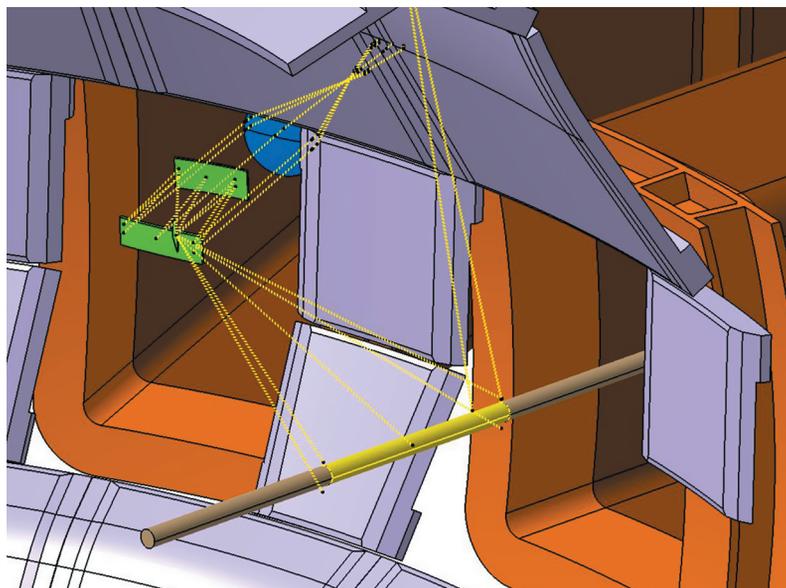


Рис. 10. Расположение оптических элементов диагностики АС в экваториальном патрубке TRT (трехмерное изображение). Также показаны возможные хорды для проведения наблюдений из верхнего патрубка установки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа была посвящена разработке концепции активной спектроскопической диагностики для токамака TRT. Было проведено моделирование работы этой диагностики для различных сценариев установки. Было показано, что построение диагностики на дейтериевом нагревном пучке будет ограничено пристеночной областью плазмы, а диагностика на водородном нагревном пучке вообще не будет работать из-за сильного падения скоростных коэффициентов

возбуждения наблюдаемых спектральных линий при увеличении энергии пучка от 250 до 500 кэВ/а.е.м.

В то же время было показано, что диагностика будет хорошо работать на диагностическом пучке токамака TRT с энергией 60 кэВ/а.е.м. в плазме со средней плотностью $n_e = 1 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. И даже при $n_e = 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ измерения в центре плазмы будут возможны, но при такой плотности увеличится погрешность измерений. С точки зрения эффективности работы активной спектроскопии

Таблица 3. Параметры элементов оптической системы сбора света

| Элемент | Ширина, мм | Высота, мм | Толщина, мм | Кривизна передней поверхности, мм | Кривизна задней поверхности, мм |
|----------------|---------------|------------|-------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Первое зеркало | 96 | 48 | — | 0 | |
| Второе зеркало | 192 | 88 | — | –1288 | |
| Третье зеркало | 226 | 84 | — | –1927 | |
| Первая линза | 206 (диаметр) | | 50 | 618 | 237 |
| Вторая линза | 72 (диаметр) | | 20 | 136 | 129 |
| Третья линза | 84 (диаметр) | | 20 | 48 | –113 |

Таблица 4. Пространственное разрешение оптической системы сбора света в зависимости от малого радиуса плазмы, полученное в результате оптимизации в ZEMAX

| Нормированный малый радиус плазмы r/a | 1.00 | 0.75 | 0.50 | 0.25 | 0.00 |
|---|------|------|------|------|------|
| Пространственное разрешение, мм | 9 | 10 | 8 | 10 | 22 |

перезарядки важнейшим параметром диагностического пучка является плотность атомов основной энергетической компоненты, а не энергия пучка, которая может меняться в достаточно широком диапазоне. По результатам моделирования была предложена схема расположения элементов диагностики в экваториальном патрубке TRT. Оптимизация оптической системы сбора излучения позволила получить оптимальное качество изображения и обеспечить хорошее пространственное разрешение для измерений.

В результате проведенной работы можно сделать вывод, что предложенная концепция устройства АС на диагностическом пучке установки TRT позволит производить измерения профиля ионной температуры, концентрации легких примесей и тороидальной скорости вращения плазмы с временным разрешением 20 мс. При этом статистические ошибки, вызванные зашумленностью спектров, не превысят 5% для температуры и концентрации и 10 км/с для скорости тороидального вращения.

Работа выполнена в рамках договора от 23.07.2021 № 17706413348210001780/226/3538-Д на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по теме: “Разработка и обоснование технических требований к основным инженерно-техническим системам токамака с реакторными технологиями (ТРТ) в обеспечении эскизного проектирования” во исполнение госконтракта 17706413348210001780.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н., Мазуль И.В., Родин И.Ю., Минеев А.Б., Кузьмин Е.Г., Кавин А.А., Карнов Д.А., Леонов В.М., Хайрутдинов Р.Р., Кукушкин А.С., Портнов Д.В., Иванов А.А., Бельченко Ю.И., Денисов Г.Г. // *Физика плазмы*. 2021. Т. 47. С. 970. <https://doi.org/10.31857/S0367292121110196>
2. Зиновьев А.Н., Афросимов В.В. // *Диагностика плазмы* / Под ред. М.И. Пергаменты. М.: Энергоатомиздат, 1990. Вып. 7. С. 56.
3. Isler R.C. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 1994. V. 36. P. 171. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/36/2/001>
4. Серов С.В., Тугаринов С.Н., von Hellermann M. // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*. 2018. V. 41. С. 89. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2018-41-2-89-94>
5. Serov S.V., De Bock M., von Hellermann M.G., Tugarinov S.N. // *Rev. Sci. Instrum.* 2021. V. 92. P. 053517. <https://doi.org/10.1063/5.0042029>
6. Тугаринов С.Н., Белокопытов А.А., Кулаков Д.М., Лукин А.В., Науменко Н.Н., Самтаров Ф.А., Серов В.В., Усольцева М.А., Хабанов Ф.О., Шигапова Н.М., Ярцев В.П. // *ПТЭ*. 2016. № 1. С. 102. <https://doi.org/10.7868/S0032816216010158>
7. Леонов В.М., Коновалов С.В., Жоголев В.Е., Кавин А.А., Красильников А.В., Куянов А.Ю., Лукаш В.Э., Минеев А.Б., Хайрутдинов Р.Р. // *Физика плазмы*. 2021. Т. 47. С. 986. <https://doi.org/10.31857/S0367292121120040>
8. Бельченко Ю.И., Бурдаков А.В., Давыденко В.И., Горбовский А.И., Емелев И.С., Иванов А.А., Санин А.Л., Сотников О.З. // *Физика плазмы*. 2021. Т. 47. С. 1031. <https://doi.org/10.31857/S0367292121110135>
9. Давыденко В.И., Иванов А.А., Ступишин Н.В. // *Физика плазмы*. 2022. Т. 48 (в печати).
10. von Hellermann M., de Bock M., Marchuk O., Reiter D., Serov S., Walsh M. // *Atoms*. 2019. V. 7. P. 30. <https://doi.org/10.3390/atoms7010030>
11. Summers H.P. // *The ADAS User Manual*, <http://www.adas.ac.uk/>.
12. Serov S.V., Tugarinov S.N., von Hellermann M. // *3rd European Confer. on Plasma Diagnostics*, Lisboa, 2019. P1. 17.
13. Jaspers R.J.E., von Hellermann M.G., Delabie E., Biel W., Marchuk O., Yao L. // *Rev. Sci. Instrum.* 2008. V. 79. P. 10F526. <https://doi.org/10.1063/1.2979874>
14. Huang J., Heidbrink W.W., von Hellermann M.G., Stagner L., Wu C.R., Hou Y.M., Chang J.F., Ding S.Y., Chen Y.J., Zhu Y.B., Jin Z., Xu Z., Gao W., Wang J.F., Lyu B., Zang Q., Zhong G.Q., Hu L., Wan B. // *Rev. Sci. Instrum.* 2016. V. 87. P. 11E542. <https://doi.org/10.1063/1.4960308>
15. von Hellermann M., Breger P., Frieling J., König R., Mandl W., Maas A., Summers H.P. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 1995. V. 37. P. 71. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/37/2/002>
16. Pavlova G.S., Serov S.V., Tugarinov S.N., von Hellermann M. // *J. Physics: Confr. Ser.* 2021. V. 2055. P. 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2055/1/012002>
17. Сдвиженский П.А., Левашова М.Г., Кукушкин А.Б., Лисица В.С., Неверов В.С., Ромазанов Ю.А., Серов С.В., Толстихина И.Ю., Тугаринов С.Н. // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*. 2020. Т. 43. С. 27. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2020-43-4-27-38>
18. Tunklev M., Breger P., Günther K., von Hellermann M., König R., O'Mullane M., Zastrow K.-D. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 1999. V. 41. P. 985. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/41/8/305>
19. Viezzer E., Pütterich T., Dux R., Kallenbach A., and the ASDEX Upgrade Team // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2011. V. 53. P. 035002. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/53/3/035002>
20. Kajita S., De Bock M., von Hellermann M., Kukushkin A., Barnsley R. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2015. V. 57. P. 045009. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/57/4/045009>
21. von Hellermann M.G., Core W.G.F., Howman A., Jupen C., König R.W.T., Stamp M.F., Summers H.P., Thomas P.R., Zastrow K.-D. // *Diagnostics for Experimental Thermonuclear Fusion Reactors* / Ed. P.E. Stott et al. N.Y.: Plenum Press, 1996. P. 321.
22. <https://www.zemax.com>.