

УДК 533.9

КОМПЛЕКС ДИАГНОСТИК ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ: КОНТРОЛЬ ЭРОЗИИ, ТЕМПЕРАТУРЫ И МОНИТОРИНГ НАКОПЛЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

© 2022 г. А. Г. Раздобарин^{а, *}, Ю. М. Гаспарян^б, Д. Л. Богачев^а, А. М. Дмитриев^{а, б},
Д. И. Елец^{а, б}, А. Н. Коваль^а, Г. С. Курскиева^а, Е. Е. Мухин^а, Д. Г. Булгадарян^б,
С. А. Крат^б, Е. Д. Маренков^б, И. В. Алексеенко^с

^а Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

^б НИЯУ Московский инженерно-физический институт, Москва, Россия

^с Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

*e-mail: [Aleksy.Razdobarin@mail.ioffe.ru](mailto:Aleksey.Razdobarin@mail.ioffe.ru)

Поступила в редакцию 01.04.2022 г.

После доработки 23.05.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Предложен проект комплекса диагностик, обращенных к плазме элементов первой стенки и дивертора токамака с реакторными технологиями (TRT). Основные задачи диагностического комплекса — контроль целостности обращенных к плазме элементов, мониторинг состояния поверхности стенки, тепловых потоков на первую стенку и диверторные мишени, а также исследование физических процессов, протекающих в материале стенки при воздействии плазмы. Приведен обзор ожидаемых эффектов воздействия плазмы на обращенные к плазме элементы, в первую очередь на вольфрамовую облицовку дивертора. На основании анализа методов, прошедших апробацию в действующих токамаках, а также разрабатываемых в рамках международного проекта ITER, предлагается комплекс взаимодополняющих диагностик, отвечающий задачам TRT. В статье обсуждается вариант реализации в TRT частотно/амплитудно-модулированного лазерного радара, двухчастотной цифровой голографии, активной (лазерной) и пассивной ИК-термографии, диагностик накопления топлива на основе лазерной десорбции и абляции, а также установка образцов-свидетелей. Предложен вариант размещения диагностик на токамаке TRT и их физической интеграции.

Ключевые слова: диагностики первой стенки, токамак TRT, накопление водорода, плазменная эрозия

DOI: 10.31857/S0367292122100249

1. ВВЕДЕНИЕ

Процессы, происходящие в плазме токамака, неразрывно связаны с состоянием поверхности контактирующих с плазмой элементов стенки. Согласно выводам, основанным на текущих исследованиях в токамаках и в лабораторных установках, взаимодействие плазмы со стенкой, в частности, срок службы обращенных к плазме элементов (ОПЭ) и накопление в них термоядерного топлива будут одними из ключевых факторов, ограничивающих энергетические характеристики проектируемых в настоящее время термоядерных установок [1]. При этом, большинство токамаков на сегодняшний день имеет достаточно ограниченный набор диагностик состояния первой стенки и захвата изотопов водорода, что, обусловлено относительно низкой энергонагруженностью и, очевидно, недооценкой роли про-

цессов, протекающих при взаимодействии плазма-стенка. Обычно, такие исследования ограничиваются контролем баланса напускаемого и откачиваемого газа, а также исследование образцов-свидетелей или отдельных частей ОПЭ после длительных экспериментальных кампаний. Первый метод не дает возможности получения информации о пространственном распределении областей захвата изотопов водорода, а периодичность анализа образцов свидетелей после длительных экспозиций затрудняет исследование динамики протекающих на поверхности стенки процессов. Помимо указанных методов, в данный момент активно развиваются дистанционные диагностики на основе лазерного воздействия, обеспечивающие возможность контроля состояния первой стенки и дивертора в режиме реального времени с хорошим пространственным и временным разрешением. Исследования при-

менимости лазерных методов проводятся в лабораторных условиях и на действующих токамаках. Первые измерения были выполнены в токамаке TEXTOR [2]. В данный момент подобные системы проходят апробацию на установках JET, EAST и др. [3–5]. В проекте ITER разработка диагностических комплексов для контроля накопления трития в диверторной области и эрозии первой стенки и дивертора включена в список приоритетных задач [6].

Эксплуатация в условиях длительных разрядов и высокой энергонагруженности ОПЭ токамака TRT также будет требовать постоянного контроля целостности облицовки первой стенки и дивертора для предотвращения их разрушения, связанного с риском повреждения несущей конструкции с контурами охлаждения. Одновременно с этим, крайний интерес будет представлять информация о химическом составе и содержании рабочего газа (в перспективе трития), морфологии поверхности (включая наличие повреждений) и, по возможности, теплофизических свойствах ОПЭ. Это важно не только для обеспечения безопасной работы установки, но и для изучения фундаментальных проблем удержания плазмы и взаимосвязи с состоянием поверхности. Отдельная задача – мониторинг тепловых потоков на стенку в режиме реального времени и использование этих данных в цепи обратной связи системы управления токамаком TRT.

Достижение максимальных параметров плазмы в токамаках требует регулярных процедур кондиционирования стенки. Возможность контроля состояния стенки могла бы дать важную информацию об эффективности процесса и помочь в выборе оптимальных режимов кондиционирования.

Ниже, в разд. 2 приводится обзор ожидаемых эффектов взаимодействия плазмы со стенкой и формулируются общие требования к диагностикам первой стенки и диверторных мишеней. Раздел 3 посвящен описанию диагностических методов. В разд. 4 представлены предложения по размещению диагностического комплекса, интеграции диагностик и приведены оценки чувствительности некоторых из них.

2. ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРА TRT

В диверторной конфигурации магнитного поля, внешние пристеночные слои плазмы двигаются преимущественно вдоль разомкнутых силовых линий и уносятся в область дивертора, где они нейтрализуются и откачиваются из объема токамака. ОПЭ в диверторной области подвергаются максимальным тепловым нагрузкам. Облицовка первой стенки испытывает меньшие тепло-

вые нагрузки, но подвержена облучению частиц с большей средней энергией, что приводит к интенсивному распылению ее поверхности. В связи с этим первую стенку обычно рассматривают, как основной источник эрозии ОПЭ.

2.1. Критические повреждения поверхности ОПЭ

Ресурс дивертора, ограничивается эрозией вольфрамовых пластин, а также усталостным разрушением ОПЭ под действием циклических тепловых нагрузок. Исследование макетов вольфрамовых мишеней ITER показало, что циклическая нагрузка в 20 МДж/м^2 приводит к возникновению глубоких трещин, которые могут распространяться вглубь до охлаждающих трубок [7]. Как следует из [8], стационарные тепловые нагрузки на диверторные мишени при мощности дополнительного нагрева более 30 МВт в TRT с большой вероятностью будут превышать 10 МДж/м^2 , приближаясь, таким образом, к пределу выносливости материала.

Импульсные тепловые нагрузки, обусловленные переходными процессами, такими как краевые локализованные моды (ELM) и срывы разряда, неизбежно будут приводить к возникновению больших температурных градиентов, напряжениям в материале и могут вызывать пластические деформации и приповерхностное растрескивание ОПЭ. Тепловые нагрузки в диверторе TRT, обусловленные ELM типа I, можно оценить на основании данных расчетов, выполненных ранее для ITER [9]. Ввиду близких значений параметров P_{sep}/R (P_{sep} – мощность, выносимая из центральной зоны токамака через сепаратрису в пристеночную плазму, R – большой радиус тороидальной камеры токамака), λ_q (толщина диверторного слоя) и $\Delta W_{ELM}/W_{ped}$ (отношение энергии ELM ΔW_{ELM} к энергии пьедестала на границе плазмы – pedestal plasma energy $W_{ped} = 3/2n_{e,ped}(T_{e,ped} + T_{i,ped})V_{plasma}$) для TRT и ITER, можно ожидать сравнимой величины импульсных нагрузок $P \approx 0.3\text{--}0.5 \text{ МДж/м}^2$ [8, 10, 11]. Исследование стойкости вольфрамовой облицовки ITER при импульсном циклическом воздействии электронного пучка, лазерного излучения и в плазменных ускорителях, продемонстрировали достаточно низкий порог разрушения поверхности [1]. Так в [12] было показано, что трещины на поверхности вольфрама появляются после первого же импульса длительностью 1 мс с плотностью энергии $\sim 0.4 \text{ МДж/м}^2$. При этом, для 10^5 импульсов порог усталостного разрушения падает до значений $0.1\text{--}0.2 \text{ МДж/м}^2$, а уже при плотности энергии $\sim 0.3 \text{ МДж/м}^2$ растрескивание сопровождается поверхностным плавлением вольфрама. Плавление вольфрамовой облицовки наблюдалось в ряде экспериментов на действующих плаз-

менных установках – JET, ASDEX-U, Alcator C-Mod [13, 14]. Следует отметить, что реализация технологии качания сепаратрисы, которую предложено использовать для распределения пиковой нагрузки на диверторные мишени по большей площади [15], может привести к эффектам усталостного разрушения вследствие постоянного термоциклирования, что требует особого внимания к целостности ОПЭ в данной области.

Реализация диагностических методов контроля состояния ОПЭ должна быть направлена на постоянный мониторинг наиболее нагруженных областей – в первую очередь области выхода сепаратрисы на диверторные мишени, с учетом ее качания. На первой стенке – это пластины подверженные наибольшему стационарному тепловым нагрузкам $\sim 3 \text{ МВт/м}^2$ в рядах 2, 3, которые служат лимитером на стадии подъема тока; 4, 5 – квазидиверторная зона; 7, 10 – защитные лимитеры (см. рис. 1). Подробную информацию о структуре ОПЭ токамака TRT можно найти в [15]. Кроме того, желательно предусмотреть возможность регулярной инспекции всей поверхности первой стенки и дивертора без нарушения вакуума. Такая возможность может понадобиться, например, при возникновении аварийных ситуаций или после больших срывов плазмы.

2.2. Взаимодействие плазмы со стенкой: модификация поверхности, переосаждение и накопление топлива

В ходе работы токамака поверхностный слой ОПЭ может существенно меняться. Под действием потоков ионов водорода и гелия происходит модификация поверхностных слоев (блистеринг, формирование “пуха” и т.д.) [16, 17], может наблюдаться развитие рельефа поверхности [18]. В областях с преимущественным осаждением продуктов эрозии бериллиевой (Be) стенки на вольфрамовые (W) мишени в диверторе возможно образование сплавов Be–W (Be_2W , Be_{12}W и Be_{22}W) [19]. В результате плазменного воздействия, можно ожидать изменения теплофизических и прочностных свойств материала [20, 21], накопления изотопов водорода в приповерхностных слоях и увеличения вероятности возникновения униполярных дуг [22]. Как следствие, возможен локальный перегрев поверхности, снижение ресурса облицовочных пластин, формирование областей повышенной эрозии на поверхности, а также эмиссия макроскопических частиц в плазму.

Эксперименты, проводимые на действующих токамаках, указывают на существенное влияние взаимодействия плазма–стенка на характеристики удержания плазмы. Так, распыление ОПЭ увеличивает концентрацию примеси в плазме, может давать заметный вклад в радиационные поте-

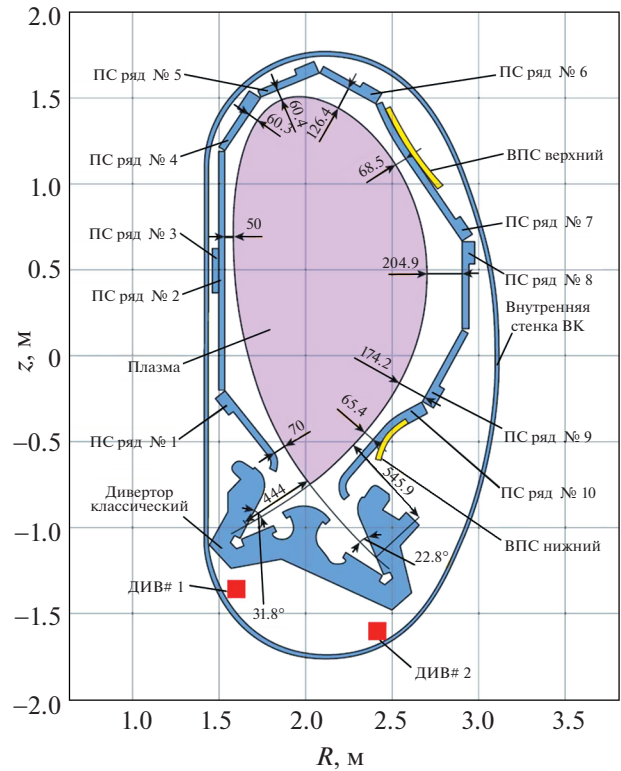


Рис. 1. Расположение защитных пластин в токамаке TRT. Цифрами 1–10 обозначены ряды облицовочных панелей первой стенки (ПС). Размерными линиями обозначены расстояния от края плазмы до ближайших конструктивных элементов. ВПС – витки пассивной стабилизации. ДИВ – дополнительные обмотки, обеспечивающие качание сепаратрисы. ВК – вакуумная камера.

ри и связанные с ними нестабильности в краевой плазме, такие как MARFE [23]. Инжекция капель с расплавленных поверхностей может, при определенных условиях, провоцировать срывы в основной плазме, что наблюдалось в экспериментах на установке Alcator C-Mod [24]. Очевидно, что модификация поверхности ОПЭ при плазменном воздействии меняет ее свойства, что, в свою очередь, будет сказываться и на самой плазме. Исследование корреляции между состоянием поверхности ОПЭ и параметрами плазменного шнура в токамаках имеет достаточно ограниченный характер, что обусловлено, в первую очередь, низкой энергонагруженностью и короткими импульсами разрядов в установках. Отдельные эксперименты на токамаке TRIAM-1M со сверхдлинными импульсами (3 часа 10 мин) показали, что в начале импульса рециклинг водорода со стенки монотонно растет пока не выходит на стационар, сравниваясь с потоками водорода из плазмы за время около 30 минут [23]. Эксперименты на T-10 также показывают, что рециклинг постепенно меняется на протяжении нескольких

разрядов после проведения литиезации [25]. Время выхода рециклинга на стационар, по видимому, зависит от параметров плазмы, однако очевидно, что структурные изменения поверхности могут иметь значительно большие характерные времена. В связи с этим имеет смысл говорить о выходе на стационар во взаимодействии плазма–стенка, как в масштабах длительности одного или нескольких импульсов для достижения баланса потоков топлива со стенки и на стенку, так и в существенно больших масштабах времен, достаточных для возникновения необратимых изменений в состоянии поверхности. Следовательно, круг задач диагностик первой стенки должен включать в себя мониторинг постепенных изменений ОПЭ, накапливаемых за времена, существенно превосходящие длительность разряда в TRT, а также исследование процессов на поверхности непосредственно в ходе горения разряда. Последнее подразумевает контроль источников и потоков десорбции запасаемого в стенках газа, что принципиально важно для обеспечения корректной процедуры напуска топлива, оптимального баланса изотопов водорода и гелиевой золы, а также достижения оптимальных характеристик плазменного разряда.

В экспериментах на токамаке JET было обнаружено, что основное накопление топлива (46.5%) происходит во внутренней части дивертора, преимущественно в результате соосаждения дейтерия с бериллием [26]. Численные расчеты транспорта продуктов эрозии бериллиевых ОПЭ в ITER показывают, что, как и в JET, внутренняя мишень дивертора в большей степени подвержена осаждению бериллиевых пленок, причем в наиболее нагруженных областях скорость осаждения ожидается $\sim 10^{21}$ ат/м⁻² с⁻¹ [27].

Для проведения детального исследования вопроса воздействия плазмы на ОПЭ и взаимного влияния стенки на плазму, необходима информация о динамике состояния поверхностей, контактирующих с плазмой, включая максимально возможную площадь поверхности первой стенки и дивертора. Интерес представляет не только полоидальное распределение характерных эффектов взаимодействия, но и локальные неоднородности, обусловленные расположением конструктивных и диагностических элементов, антенн, геометрией ввода нагревных пучков и т.д. Подобные неоднородности наблюдаются в действующих плазменных установках. Выраженная тороидальная асимметрия осаждения W, Fe, Cr, Mo наблюдалась, например, в стеллараторе LHD, что было вызвано распределением материалов антенн электрон-циклотронного (ECRH) и ионно-циклотронного нагрева (ICRH) [28]. Оптимальным решением представляется комбинация методик, включающая максимально возможный охват поверхности в полоидальном, а по возможности, и в

тороидальном направлениях методами дистанционного зондирования и дополнительное размещение образцов-свидетелей в отдельных интересующих областях. Использование предлагаемого диагностического комплекса также направлено на изучение эффективности удаления/захвата рабочего газа при кондиционировании стенок, обосновании периодичности и длительности дегазации установки.

Отдельный интерес представляют исследования при использовании ОПЭ на основе лития, т.к. детальных исследований на сегодняшний день не существует. Большой проблемой данных исследований является высокая химическая активность лития, приводящая к потере изотопов водорода из литиевых слоев при контакте с атмосферным воздухом [29]. По этой причине использование in-situ диагностик ОПЭ на основе лития является необходимым для получения полной информации о состоянии стенки.

2.3. Мониторинг тепловых потоков на первую стенку и диверторные мишени

Ограничение тепловой нагрузки на конструкционные материалы токамаков – одно из обязательных условий их работы в режиме длинных и квазинепрерывных импульсов. Измерение температурных полей на поверхности ОПЭ в режиме реального времени является эффективным инструментом, который не только дает информацию о тепловой нагрузке на стенку, но и может использоваться в системе обратной связи управления горением плазмы. Системы измерения температуры в реальном времени на основе температурных датчиков или при помощи ИК-термографии успешно реализованы на целом ряде токамаков. Высокое пространственное и временное разрешение метода ИК-термографии позволило получить данные о ширине пристеночного слоя λ_q [30], исследовать краевые эффекты, связанные с формой профилирования облицовочных пластин [31], делать оценки потоков тепловой энергии, выносимой на стенку убегающими электронами [32] и контролировать температуру наиболее нагруженных конструктивных элементов, в частности антенн дополнительного нагрева [33]. Особый интерес представляет опыт использования температурных измерений в цепи обратной связи управления токамаком. Так, в экспериментах на EAST переход в режим детачмента и его поддержание обеспечивалось импульсным напуском нейтрального газа Ne + D₂ по управляющему сигналу диагностики ИК-термографии [34]. Аналогичный метод использовался при управлении мощностью дополнительного нагрева для ограничения температур антенн в токамаке Tore-Supra [35].

В TRT диагностические методы, направленные на контроль температуры ОПЭ, должны обеспечивать возможность мониторинга дивертора и большей части поверхности первой стенки с пространственным и временным разрешением, достаточным для решения следующих задач:

1. Определение профилей пространственного распределения тепловой нагрузки на диверторные пластины: асимметрия нагрузки на внутреннюю и наружную мишени дивертора, область пересечения мишеней сепаратрисой (в т.ч. при реализации технологии качания сепаратрисы), данные о ширине пристеночного слоя λ_q .

2. Контроль тепловых нагрузок на наиболее нагруженные области первой стенки, главным образом стартовые и защитные лимитеры 2, 3, 7, 10 и пластины 4, 5 в квазидиверторной зоне (см. рис. 1), антенны дополнительного нагрева. Мониторинг тепловых нагрузок при срывах плазмы; детектирование убегающих электронов и оценка энергии, выносимой ими на стенку.

3. Использование в цепи обратной связи управления токамаком. Управление мощностью нагрева и/или инжекцией нейтрального газа в область дивертора по сигналу системы мониторинга температуры в выделенных (наиболее нагруженных) зонах.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

3.1. Модулированный лазерный радар

Диагностическая система, основанная на методе частотно (FM) и/или амплитудно-модулированного (AM) лазерного радара (LIDAR), позволяет получать информацию о крупномасштабной эрозии обращенных к плазме элементов стенки, а также о профиле и наклоне поверхности ОПЭ.

В методе LIDAR, основанном на модуляции амплитуды лазерного излучения, расстояние до объекта измеряется по задержке сигнала, отраженного от исследуемой поверхности.

$$d = c\varphi/2\omega,$$

где ω – круговая частота модуляции амплитуды лазерного излучения, φ – набег разности фаз модуляции, а c – скорость света. Очевидным преимуществом данного подхода является простота, однако он имеет ряд недостатков, связанных с зависимостью φ от интенсивности измеренного сигнала. Так, изменение пропускной способности оптической схемы из-за деградации пропускания ее отдельных компонентов в процессе эксплуатации, а также неоднородность отражения от исследуемой поверхности, приводят к снижению точности измерения расстояния методом AM-LIDAR до нескольких миллиметров [36]. Кроме того, в связи с тем, что данная система из-

меряет не абсолютное, а относительное расстояние на одной длине волны модуляции, точность измерений может ухудшаться из-за перескоков фазы через 2π .

В FM-LIDAR с линейной модуляцией оптической частоты лазерного излучения временная задержка между переданным и принятым сигналами пропорциональна разности соответствующих частот (f_1) и (f_2), а также скорости изменения передаваемой частоты [37]. Таким образом расстояние до объекта d вычисляется, как:

$$d = \frac{c|f_1 - f_2|}{2df/dt}.$$

FM-LIDAR, в отличие от AM-систем, позволяет производить абсолютное измерение расстояния от торца волокна до объекта и не имеет погрешностей, связанных с перескоком фазы через 2π , а также демонстрирует меньшую чувствительность к неоднородности коэффициента отражения исследуемой поверхности и нечувствителен к многократным отражениям [38]. При проведении измерений в условиях токамака можно ожидать субмиллиметровой точности в определении расстояния при помощи такой системы. С другой стороны, FM-система не обеспечивает построение двумерных изображений объекта из-за того, что амплитуда измеряемого сигнала модулируется его фазой, зависящей от расстояния до объекта.

В связи с этим система измерения эрозии первой стенки токамака ITER (InVessel Viewing and metrology System – IVVS) разрабатывается на базе комбинации двух вышеперечисленных методов [38], в которой AM-LIDAR используется для построения двумерных изображений стенки, а FM-LIDAR – для построения трехмерной карты поверхности ОПЭ. Точность измерения рельефа поверхности первой стенки при помощи данной системы ограничивается в первую очередь воспроизводимостью положения первого оптического элемента после его установки в рабочее положение. Для калибровки положения выдвижных зондов в данной системе предусмотрены специализированные реперные метки, расположенные на первой стенке между модулями бланкета.

Успешное применение метода FM-LIDAR для сканирования ОПЭ было продемонстрировано на токамаке TFTR. Исследования, проведенные после завершения дейтериево-тритиевого эксперимента в 1999 году, позволили зафиксировать отслоение соосаженных углеводородных пленок на графитовых тайлах ОПЭ первой стенки [39].

3.2. Двухчастотная цифровая голография (ДЦГ)

Для контроля эрозии ОПЭ токамака предлагается использовать метод двухчастотной цифровой голографии (ДЦГ). Данный метод позволяет

оценить амплитуду и фазу волнового фронта путем анализа интерференции опорного и предметного пучков [40]. Две голограммы на разных длинах волн записываются одновременно, либо последовательно с использованием одного перестраиваемого или двух лазеров. Пространственное распределение разности фаз, извлеченных из голограмм, зарегистрированных на двух разных длинах волн дает информацию о профиле поверхности. Так, если направление освещения и наблюдения объекта перпендикулярны его поверхности, то для рассчитанной разности фаз в 2π изменение профиля поверхности объекта будет определяться выражением:

$$\Delta z = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2|\lambda_1 - \lambda_2|} = \frac{\Lambda}{2},$$

где λ_1 и λ_2 — длины волн, используемые для записи голограмм, а Λ — т.н. синтетическая длина волны. Важным преимуществом данного метода является возможность изменения динамического диапазона измерения путем смещения одной рабочей частоты относительно второй. Исследование применимости метода для контроля эрозии в ИТЕР [41] показало возможность измерения формы объектов, находящихся на расстоянии более 20 м от измерительной системы, с точностью по глубине ± 10 мкм.

Пространственное разрешение метода ДЦГ определяется характерным размером спеклов на матрице приемника. Регистрируемая спекловая структура является результатом интерференции опорного луча и луча, отраженного от шероховатой поверхности исследуемого объекта, и зависит от соотношения $\lambda f/D$, где D — диаметр эффективной апертуры оптической схемы, λ — длина волны лазера, а f — эффективное фокусное расстояние системы. Размер спеклов накладывает ограничение на размер диафрагм, используемых для защиты от загрязнения первых оптических элементов. Например, для фокусного расстояния — 1 м и размера диафрагмы — 1 мм, минимально достижимое латеральное разрешение на длине волны 1 мкм будет составлять ~ 1 мкм.

Один из основных источников шума в данном методе связан с лазерной спекл-структурой, которая является результатом взаимной интерференции на случайных неоднородностях шероховатой поверхности, приводящей к случайному распределению интенсивности интерференции в области наблюдения. При этом, для возникновения такой спекл-структуры наличие опорного поля необязательно. Вызванный этим шум можно уменьшить, путем усреднения нескольких измерений с различными парами длин волн с постоянной синтетической длиной волны Λ . Реализация серии последовательных измерений с постоянной Λ требует наличия лазерной систе-

мы, перестраиваемой в достаточно широком спектральном диапазоне.

Размещение элементов оптической схемы на различных конструкционных элементах токамака может привести к возникновению непредсказуемых фазовых сдвигов из-за вибраций, создаваемых насосами, а также вследствие тепловых искажений геометрии опор. Чтобы сделать систему нечувствительной к вибрациям необходимо обеспечить проведение измерений за время много меньше, чем период собственных колебаний конструкции. Для этого было предложено использовать схему, состоящую из двух импульсных лазеров, в которой регистрация цифровых голограмм на двух различных длинах волн осуществляется одновременно одним детектором. Данный подход успешно применялся в экспериментах по измерению профиля объектов в условиях вибраций в рамках разработки диагностики ДЦГ для ИТЕР [41].

Еще одним фактором, усложняющим интерпретацию данных диагностики может быть необходимость разрешать мелкие детали на фоне рельефа заметно большего масштаба или существенного наклона исследуемой поверхности. Если фазовый сдвиг, обусловленный формой поверхности превышает 2π , необходимо комбинировать ДЦГ с другими методами, которые могут предоставить информацию о крупных неоднородностях и/или угле наклона поверхности по отношению к волновому фронту. В ходе математической обработки сигнала, эти данные можно будет учесть для компенсации фазового сдвига. В диагностическом комплексе TRT предлагается использовать комбинацию методов ДЦГ-LIDAR, обеспечивающих динамические диапазоны измерения 10 мкм—1 мм и более 1 мм соответственно.

3.3. Инфракрасная термография

Контроль температуры поверхности ОПЭ токамака, является важной задачей, позволяющей обеспечить целостность элементов первой стенки и дивертора. В ряде существующих токамаков для температурных измерений в ходе работы токамака, применяются системы, основанные на методе инфракрасной термографии. Помимо непосредственно контроля за температурой стенки данная система, включенная в систему управления параметрами токамака, позволяет предотвращать разрушение ОПЭ вследствие превышения допустимых тепловых нагрузок [34].

Принцип метода пассивной инфракрасной термографии (ПИТ) заключается в наблюдении за тепловым излучением ОПЭ первой стенки и дивертора во время плазменных разрядов. Для этих задач применяются специализированные инфракрасные камеры, работающие в спектраль-

ном диапазоне 1.5–5.0 мкм [31]. При проведении количественных измерений перед камерой устанавливаются одноволновый узкополосный фильтр. Сбор света в таких системах осуществляется при помощи зеркал и оптических элементов, изготовленных из прозрачных для инфракрасного излучения материалов, например, Al_2O_3 , ZnS, ZnSe, Ge. Такие системы используются в установках WEST [33], EAST [34], а также JET и ASDEX [42]. Пространственное разрешение современных систем ПИТ составляет доли миллиметра [33]. В настоящее время ведется разработка системы ПИТ для токамака ITER [43]. Для проведения абсолютных измерений температуры ОПЭ при помощи системы ПИТ в ITER предлагается использовать лазеры, расположенные в диагностическом помещении, обеспечивающие калибровку детекторов, и лазеры, выдвигаемые внутрь объема токамака с помощью роботизированных систем, предназначенные для калибровки оптической схемы во время плановых остановок токамака. Также для промежуточной калибровки предполагается использование термопарных измерителей, установленных на первой стенке и в диверторе.

Для применения в TRT предлагается также использование активной лазерной инфракрасной термографии (АЛИТ), что позволит выявлять трещины, а также диагностировать и исследовать параметры модифицированных и соосаженных слоев на поверхности ОПЭ [44]. При помощи метода синхронного детектирования (lock-in) АЛИТ осуществляет измерение температуры ОПЭ, вызванное внешним нагревом за счет лазерного излучения. АЛИТ позволяет определять толщины соосаженных слоев в диапазоне от микрометров до миллиметров, а также качество адгезии слоя. При этом используется достаточно маломощное лазерное излучение (~5 Вт), которое не приводит к заметному повышению температур поверхности ОПЭ и искажению параметров слоев. Для интерпретации данных АЛИТ применяется итерационная модель распространения тепла от лазерного луча по поверхности ОПЭ. Эксперименты, проведенные с углеродными и вольфрамовыми слоями, показали хорошую сходимость данной модели с экспериментальными данными.

3.4. Лазерно-индуцированная масс-спектрометрия (LIA-QMS, LID-QMS) для мониторинга накопления изотопов водорода

Лазерное излучение позволяет реализовать различные методики контроля элементного состава поверхностного слоя, включая содержание в них изотопов водорода. Наиболее простым методом с точки зрения реализации является лазерно-индуцированная масс-спектрометрия (LIA-QMS, LID-QMS). Лазерное излучение через

систему зеркал направляется на анализируемый участок ОПЭ, что приводит к высвобождению захваченного в поверхностном слое частиц. Далее анализируется интегральное количество газообразного материала путем измерения парциального давления отдельных газов. Для этой диагностики можно использовать штатный масс-спектрометр, находящийся на значительном удалении от исследуемой поверхности. Наиболее часто сейчас используются квадрупольные масс-спектрометры, отсюда и аббревиатура QMS в названии методов лазерно-индуцированной абляции (Laser Induced Ablation–Quadrupole Mass-Spectrometry–LIA-QMS) и лазерно-индуцированной десорбции (Laser Induced Desorption–Quadrupole Mass-Spectrometry–LID-QMS).

Варьируя мощность лазерного излучения, можно реализовать режим десорбции или абляции. В первом случае температура поверхности не превышает порога плавления, что приводит к десорбции захваченных газов без нарушения целостности поверхности. Глубина анализа в этом режиме определяется длительностью импульса лазерного излучения, т.к. захваченным частицам необходимо диффундировать из объема до поверхности. Согласно расчетам [45] при длительности импульса порядка 10 нс десорбция дейтерия из вольфрама происходит из поверхностного слоя толщиной около 50 нм. При использовании лазерного излучения длительностью масштаба 1 мс глубина анализа увеличивается до нескольких микрометров. При увеличении мощности излучения растет максимальная температура поверхности и количество вышедшего газа. Нагрев поверхности лазерным излучением также сильно зависит от его термических характеристик (теплопроводность, теплоемкость), поэтому для количественного анализа содержания водорода в поверхностном слое может потребоваться дополнительная информация о воздействии лазерного излучения на поверхность, в частности данные измерения динамики температуры поверхности оптическими методами.

При дальнейшем увеличении мощности сначала происходит плавление поверхности, а потом и абляция поверхностного слоя с образованием лазерной искры. В режиме абляции состав покидающих поверхность частиц более сложный и включает не только молекулы, но и атомы, и ионы, что может потребовать дополнительных калибровочных экспериментов. Измерения в режиме абляции открывают дополнительные возможности по сравнению с режимом десорбции, в частности, измерение распределения захваченного газа по глубине. Одновременно с масс-спектрометрическими измерениями можно проводить спектроскопию плазмы лазерного факела (Laser Induced Breakdown Spectroscopy – LIBS). Метод LIBS предоставит дополнительную ин-

формацию о составе осадений, а также позволит контролировать процесс абляции, чтобы избежать повреждения стенки токамака.

Для мониторинга накопления топлива непосредственно в ходе плазменных разрядов также рассматривается возможность проведения измерений содержания топлива лазерно-индуцированными методами с использованием эмиссионной спектроскопии в краевой плазме. Методы спектроскопии лазерно-индуцированной абляции (Laser Induced Ablation Spectroscopy – LIAS) и спектроскопии лазерно-индуцированной десорбции (Laser Induced Desorption Spectroscopy – LIDS), основанные на лазерной абляции и десорбции, соответственно были опробованы в токамаке TEXTOR [3]. Согласно выводам авторов, данные методы имеют перспективы применения в ITER в комбинации с диагностикой LIBS.

В настоящее время готовится апробация диагностики накопления изотопов водорода в токамаке Глобус-M2.

3.5. Метод лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии – LIBS

В методе лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (LIBS) предполагается облучение материала первой стенки коротким мощным лазерным импульсом, в результате чего происходит абляция и ионизация аблированного материала. Излучение плазмы лазерного факела регистрируется спектрометром. По результатам этих измерений можно определить состав плазмы и, соответственно, сделать выводы о составе поверхности облученного образца. Типичная интенсивность лазерного излучения, используемого в этом методе, составляет порядка 500 МВт/см^2 при длительности импульса несколько наносекунд [46]. LIBS рассматривается как перспективная методика для определения накопления дейтерия (D) и трития (T) в материалах, контактирующих с плазмой, а также для определения состава напыленных на них слоев материалов (W, Be, Al, Mo, Li, C) с возможностью профилирования по глубине при последовательном облучении одной области. К настоящему времени LIBS уже апробирован на некоторых токамаках, например, FTU [47] и EAST [48]. Однако, точность проводимых измерений по-прежнему является предметом исследования.

Наибольший интерес представляет использование LIBS без дополнительной калибровки (Calibration Free LIBS, CF-LIBS). При этом для интерпретации результатов измерения спектрометром предполагается, что образовавшаяся в результате абляции плазма оптически прозрачна и для определения ее параметров можно использовать метод Саха–Больцмана (СБ) [49]. Сравнение с другими методиками анализа показывает, что

CF-LIBS обладает достаточно высокой точностью [50, 51]. Так, определение накопления дейтерия D в W-Al-D-пленках, измеренное с помощью методов CF-LIBS и ТДС в работе [51] показало отличие всего в 1%. Однако, нужно отметить, что разброс точек на графике СБ в этих работах соответствует разбросу интенсивности в несколько раз. Поэтому точность в 1% является оптимистичной оценкой.

Подробный анализ точности CF-LIBS на примере накопления дейтерия D в вольфраме W-методом численного моделирования, был проведен в [52]. Расчеты показали, что ошибка, связанная с нарушением условий ЛТР, снижается с увеличением интенсивности лазерного излучения и при интенсивности 10^{10} Вт/см^2 составляет 30%. Уменьшение ошибки связано с ростом электронной плотности при постоянной электронной температуре, что соответствует лучшему выполнению условий локального термодинамического равновесия (ЛТР), которое необходимо для применения метода СБ. Опираясь на все эти результаты, можно ожидать точности CF-LIBS около десятков процентов.

3.6. Исследование образцов-свидетелей

Использование образцов-свидетелей различных конструкций является одним из наиболее распространенных способов определения областей преимущественного осаждения и эрозии в крупных установках УТС [53, 54]. Такие образцы размещаются внутри установки на период от одного разряда до нескольких экспериментальных кампаний, после чего проводится анализ их поверхности. Конструкция образца-свидетеля зависит от типа собираемой информации о функционировании установки. Чувствительность, разрешение, погрешность метода определяются параметрами диагностик, применяемых для исследования образцов. Широко используются сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) поверхности и поперечного среза образцов совместно с энерго-дисперсионной спектроскопией (ЭДС) [55], профилометрия поверхности образцов, а также методы основанные на облучении поверхности ионными пучками высоких энергий от десятков кэВ до нескольких МэВ [56]. Для определения содержания топлива применяют анализ при воздействии ионным пучком (анализ по ядрам отдачи, анализ методом ядерных реакций) [29], термодесорбционную спектроскопию [56].

Часто на поверхность образцов наносят “маркерные слои”, т.е. покрытия известного начального состава и толщины. Такие слои могут наноситься как на целые тайлы [29], так и на небольшие образцы, устанавливаемые в облицовку стенки [57]. В первом случае обычно использует-

Таблица 1. Задачи и диагностические методы исследования первой стенки и диверторных мишеней токамака TRT. О – основная диагностика. Д – дополнительная диагностика

Задачи	Диагностики									
	LIDAR	ДЦГ	АЛИТ	LIA-QMS	LID-QMS	LIBS	LIAS	LIDS	ПИТ	Обр. свид.
Контроль критических разрушений: плавление, растекание, образование глубоких трещин	О	Д	О							
Модификация поверхности: рекристаллизация, образование пуха, блистеринг, развитие рельефа, поверхностное плавление, растрескивание	О	О	О							Д
Мониторинг осаджений продуктов эрозии ОПЭ		О	Д			О	Д			О
Измерение содержания изотопов водорода				О	О	Д	Д	Д		О
Измерение температуры ОПЭ									О	

ся тот же материал покрытия, что и материал облицовки, на которую он наносится. Толщина таких вольфрамовых маркеров, используемых в диверторе токамака JET, составляет ~3 мкм, точность измерений ~100 нм. Во втором случае, в силу малого по сравнению с тайлами, размера образцов, возможно применение различных материалов покрытий для изучения их эрозии и предсказания поведения первой стенки в случае их применения в установке (например, использование образцов из бериллия Ве и вольфрама W в JET с углеродной стенкой [58]). Толщина покрытий таких образцов, используемых на внутренней стенке токамака JET, составляла ~1.5 мкм для Ве, 250 нм для W, точность измерений ~20 нм для Ве, 1 нм для W.

Помимо изучения распыления и транспорта частиц, при помощи набора образцов маркеров с различными покрытиями возможна также оценка локальных энергетических спектров частиц, распыляющих стенку установки, в областях энергий от 10 эВ до 50 кэВ в том числе в труднодоступных для других диагностик областях [59].

В теневой области могут устанавливаться образцы разной геометрии. При использовании коллекторных образцов с узкими входными щелями, например, была получена информация о пространственном распределении потоков частиц, приводящих к образованию соосажденных слоев [60]. Возможно также проведение разреженных по времени измерений, например, с использованием кварцевых датчиков осаждения или образцов-коллекторов с медленно вращающимся входным отверстием [61].

4. РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИК ПЕРОВОЙ СТЕНКИ В TRT

В табл. 1 приведены диагностики, предлагаемые для мониторинга первой стенки и диверторных мишеней токамака TRT. Исходя из сформулированных в первом разделе задач, диагностический комплекс должен обеспечить обзор всей поверхности ОПЭ во время разрядов и между ними для контроля температуры и целостности облицовки. Также необходимо иметь возможность детального исследования поверхности в областях преимущественного напыления и эрозии. Предполагается, что совокупность данных, полученных разными методиками, позволит получить информацию о развитии рельефа поверхности, возникновении модифицированных и рекристаллизованных слоев, сделать выводы о составе и толщине осаджений, включая содержание изотопов водорода в них. В качестве обзорных диагностик предлагается использовать частотно/амплитудно-модулированный лазерный радар (LIDAR), а также активную и пассивную ИК-спектроскопию. Разумным требованием для пространственного разрешения данных диагностик является масштаб 2–3 мм. Для более детального исследования поверхности и приповерхностных слоев планируется дополнительно задействовать диагностики двухчастотной цифровой голографии (ДЦГ) и лазерные методы исследования осаджений, основанные на лазерной десорбции и абляции (LIBS, LIAS, LIDS, LIA-QMS/LID-QMS).

В дополнение к оптическим методам диагностики первой стенки в объеме TRT планируется

размещение образцов – свидетелей, которые могут быть закреплены неподвижно или же устанавливаться на передвижных зондах.

При реализации диагностик первой стенки в TRT основной упор планируется сделать на объединении элементной базы и физической интеграции методов. Важной особенностью предлагаемого подхода является объединение методов в единый комплекс для чего будут совмещены области наблюдения и сбора данных, что позволит:

– Проводить кросс-проверку данных: независимо измерять накопление топлива методами LIA-QMS, LID-QMS, LIBS, LIAS, LIDS. Получать данные о толщине осадений методами лазерной ИК-термографии, LIBS, ДЦГ. Получать данные о рельефе поверхности методами ДЦГ и LIDAR.

– Упрощать интерпретацию результатов, комбинировать методы для получения более полной информации о состоянии ОПЭ. Проводить калибровку метода LIBS по измерениям поверхностной плотности изотопов водорода методами LIA-QMS, LID-QMS. Использовать данные LIDAR для корректировки набега фаз на крупномасштабных неоднородностях или вследствие наклона поверхности при интерпретации данных ДЦГ. Комбинировать методы LIDAR, ДЦГ и лазерной ИК-термографии для получения данных о рельефе в разных масштабах, о наличии глубоких и приповерхностных трещин, а также о наличии и свойствах модифицированных слоев и/или осадений на поверхности в одной и той же локальной области. Получать информацию о толщине осадений путем измерения глубины лазерных кратеров комбинируя методы ДЦГ и LIA-QMS.

Область покрытия предлагаемых диагностик, периодичность, достижимые разрешения и точность измерений приведены в табл. 2.

Необходимость обзора всей поверхности стенки и в то же время высокого пространственного разрешения в отдельных ее областях требуют использования нескольких оптических каналов. Оптимальным вариантом было бы размещение обзорных диагностик в экваториальных патрубках, а диагностик для мониторинга интересующих областей дивертора (наиболее нагруженные области и области с преимущественным напылением) – в диверторе под куполом, по аналогии с расположением диагностики ДЦГ в ITER. Текущая геометрия диверторных каскет токамака TRT, однако, затрудняет размещение под куполом в существующих вырезах каскет одновременно схем ввода лазерного излучения и сбора света с возможностью сканирования мишеней, в связи с чем рассматриваются два альтернативных варианта расположения оптики:

1. Ввод лазерного излучения и сбор света лазерных диагностик накопления топлива в дивер-

торе LIA-QMS, LID-QMS, LIBS, LIAS, LIDS, и диагностики ДЦГ осуществляется через щель между диверторными каскетами. Часть оптики может быть размещена под куполом. Обзорные диагностики LIDAR, активная и пассивная ИК-термография, а также диагностики накопления топлива в первой стенке располагаются в экваториальном патрубке. Основным недостатком такой компоновки является узкий сектор обзора диверторных мишеней и возможные ограничения, связанные с размещением технологического оборудования TRT под каскетами.

2. Все диагностики внутренней мишени дивертора располагаются вместе с обзорными диагностиками в экваториальном патрубке. Схемы сбора света диагностик внешней мишени размещаются под куполом в вырезе между каскетами, а ввод лазерного излучения осуществляется либо из смежного выреза, либо из экваториального патрубка. Второй вариант требует дополнительного анализа для оценки качества лазерного пятна на поверхности мишени. Пример совмещения схем сбора света обзорных диагностик и диагностик внутренней мишени дивертора в экваториальном патрубке и наблюдения наружной мишени из-под купола приведен на рис. 2. Зеленым цветом на рисунке показаны лучи системы сбора света обзорных диагностик. Красным – диагностики диверторной области. В обоих случаях для вывода излучения предполагается использовать зеркальную оптику. Решение о возможности использования оптоволокон в вакуумном объеме TRT будет принято после анализа тепловых и нейтронных нагрузок, а также по результатам оценки интенсивности потоков примеси в области расположения оптических компонентов.

Прототипом комплекса обзорных диагностик поверхности первой стенки, внутреннего и внешнего дивертора TRT являются широкоугольная система обзора (WAVS) и внутривакуумная система обзора и метрологии (IVVS), разработываемые для ITER [38]. При этом, существует ряд серьезных отличий, которые усложняют адаптацию систем к условиям TRT. В первую очередь – это отсутствие в TRT верхних портов, которые обеспечивают в ITER удобный обзор области дивертора. Для одновременного покрытия областей центральной колонны, наружной стенки и дивертора при размещении обзорных систем в экваториальных патрубках TRT потребуется как минимум 4 оптических канала. Вариант оптической схемы широкоугольного зеркального объектива одного из 4-х каналов в экваториальном патрубке показан на рис. 2. Область, охватываемая четырьмя каналами, расположенными в одном патрубке показана на рис. 3. Чтобы покрыть всю обращенную к плазме поверхность токамака необходимо установить такие 4-канальные системы эквидистантно в 5-экваториальных патрубках. В каче-

Таблица 2. Параметры диагностических методов исследования первой стенки и диверторных мишеней токамака TRT

Диагностика	Контролируемый параметр	Область покрытия	Периодичность	Диапазон, точность, разрешение
Лазерный радар (AM/FM LIDAR)	Рельеф поверхности, глубина эрозии	Первая стенка, дивертор	Раз в несколько десятков разрядов, во время регламентных работ	Диапазон: >1 мм. Разрешение по глубине 1 мм. Пространственное разрешение 2–3 мм
Двухчастотная цифровая голография (ДЦГ)	Рельеф поверхности, глубина эрозии, толщина осадений	Области преимущественного напыления и эрозии на внутренней и внешней мишенях дивертора	Между разрядами	Диапазон: 10 мкм–1 мм. Разрешение по глубине < 10 мкм. Пространственное разрешение 0.1–1 мм
Пассивная ИК-термография (ПИТ)	Температура поверхности	Первая стенка, дивертор	Постоянно во время разрядов	Диапазон: 600 – 3000 К. Отн. ошибка 15% для 600 К, уменьшается с ростом температуры. Разрешение 2–3 мм
Активная лазерная ИК-термография (АЛИТ)	Наличие поверхностных структурных дефектов, параметры осадений	Первая стенка, дивертор	Раз в несколько десятков разрядов, во время регламентных работ	Пространственное разрешение 2–3 мм
LIBS	Состав осадений, содержание изотопов водорода	Области преимущественного напыления на внутренней и внешней мишенях дивертора	Между разрядами	Нужны оценки предела и точности измерения. Пространственное разрешение 1–2 мм
LIA-QMS, LID-QMS	Содержание изотопов водорода в ОПЭ и осадениях	Первая стенка, дивертор	Между разрядами	Нижний предел детектирования зависит от толщины осадений. Для слоя 10 мкм, чувствительность $\sim 1 \times 10^{20} \text{ м}^{-2}$. Пространственное разрешение 1–5 мм
LIDS, LIAS	Содержание изотопов водорода в ОПЭ и осадениях	Внутренний, внешний дивертор	Во время разрядов	Нужны оценки предела и точности измерения. Пространственное разрешение 1–5 мм
Образцы-свидетели	Рельеф поверхности, глубина эрозии, толщина осадений, содержание изотопов водорода	Первая стенка, дивертор	Стационарные или между разрядами (при использовании передвижных материаловедческих зондов)	Диапазон: нм–мм. Точность <1 нм. Пространственное разрешение <1 мкм

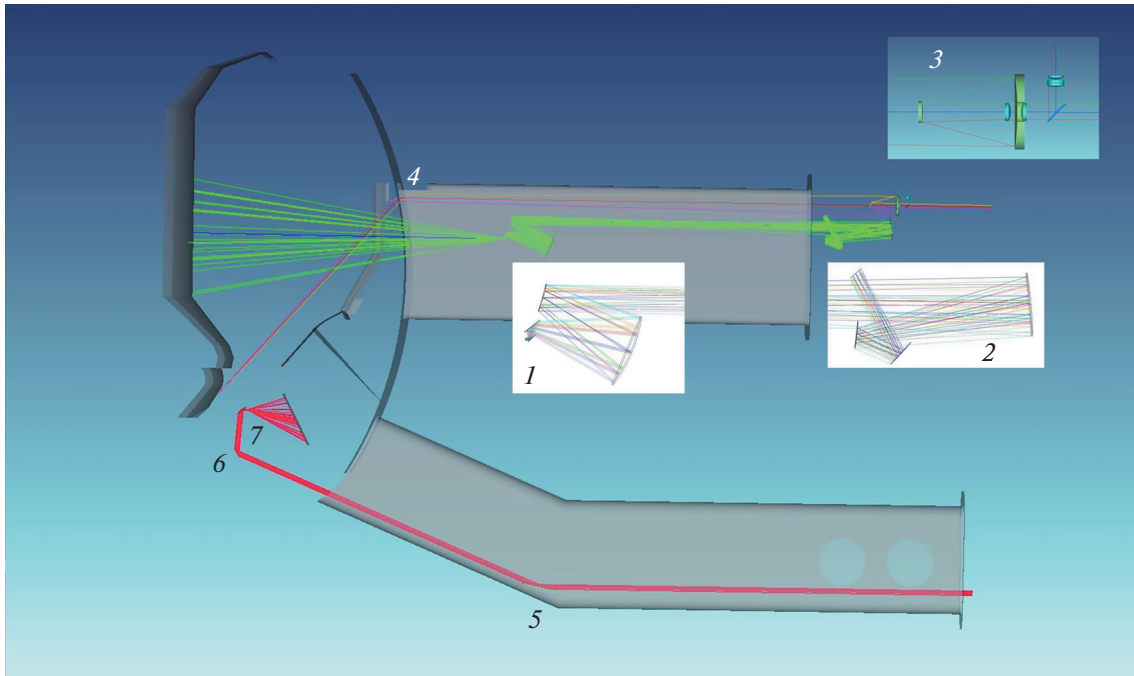


Рис. 2. Схемы сбора излучения обзорных диагностик и диагностик мониторинга областей дивертора. Показан вариант обзора внутренней мишени дивертора из экваториального патрубка. Схемы ввода и сбора излучения диагностик наружной мишени расположены под куполом. 1, 2 – входной и выходной объективы обзорных диагностик, 3 – выходной объектив диагностик внутренней диверторной мишени, 4 – поворотное сканирующее зеркало, 5–7 – зеркала схемы обзора наружной диверторной мишени.

стве альтернативного варианта можно рассмотреть установку отдельных систем обзора наиболее нагруженных локальных областей первой стенки и дивертора в дополнение к обзорной системе, обеспечивающей максимальное поле зрения из одного порта.

Периодичность измерений различными методами определяется, в первую очередь физическими задачами, а также временем, необходимым для проведения измерений. В частности, лазерное сканирование всей стенки, лежащее в основе обзорных диагностик состояния поверхности LIDAR и активной ИК-термографии, потребует не менее нескольких часов, что делает нецелесообразным частое использование этих методов.

Ограниченная светосила широкоугольного зеркального объектива, расположенного в экваториальном патрубке (см. рис. 2), а также наличие непрерывного фона, связанного с излучением плазмы и тепловым излучением элементов оптического тракта, могут накладывать ограничения на диапазон температур, измеряемых методами активной и пассивной ИК-термографии. Для оценки ошибок измерений, связанных с фоновой засветкой, был проведен анализ вклада непрерывного фона, обусловленного тормозным излучением (ТИ) в объеме, ограниченном телесным углом сбора света объектива. Сравнение спек-

тральной интенсивности ТИ-электронов, имеющих максвелловское распределение по скоростям с температурой T_e , с интенсивностью полезного сигнала проводилось в предположении излучения стенки с коэффициентом эмиссии вольфрама около 0.1 [62]. Расчет вклада ТИ при обзоре первой стенки и диверторных пластин был выполнен аналогично процедуре, описанной в [63] для характерных параметров плазмы TRT $n_e = 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $Z_{eff} = 2$ в диапазоне электронных температур $T_e = 0.1\text{--}10^4 \text{ эВ}$ [8, 64]. Как видно из рис. 4, спектральная интенсивность ТИ сравнима с полезным сигналом при температуре стенки 600 К, и составляет менее 30% при температуре 700 К в спектральном диапазоне 4–5.5 мкм. Это позволит регистрировать температуру более 600 К с ошибкой, не превышающей 15% при использовании оптики из Al_2O_3 для вывода излучения из вакуумного объема TRT. В предложенной схеме будет необходимо предусмотреть охлаждение ближайших к плазме зеркал для снижения их теплового излучения.

Ограничения, связанные с чувствительностью и шумами регистрирующей аппаратуры, касаются, в первую очередь метода активной лазерной ИК-термографии, что обусловлено требованиями к нижнему пределу измеряемой температуры и ее точности. Для предложенной схемы сбора

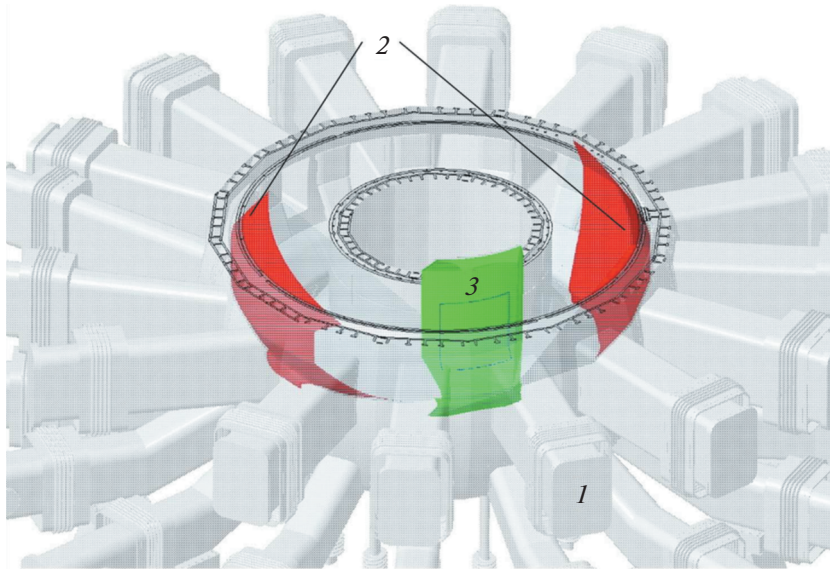


Рис. 3. Области покрытия одного канала обзорной системы, расположенной в экваториальном патрубке. 1 – патрубок, из которого производится обзор поверхности стенки, 2 – области обзора на наружной стенке камеры TRT (выделены красным цветом), 3 – область обзора на внутренней стенке камеры TRT (выделена зеленым цветом).

света обзорной диагностики (см. рис. 2) с размерами первого зеркала 8 мм и расстоянием до первой стенки 2.3 м интенсивность сигнала на матрице камеры на длине волны 4 мкм при температуре стенки 300 К и разрешении 2–3 мм составляет $\sim 10^5$ – 10^6 фотонов/(пиксель·сек) для спектральной полосы 100 нм, что позволит в паузах между разрядами или кампаниями проводить измерения лазерно-индуцированного нагрева поверхности при исходной температуре близкой к 300 К. При необходимости, уровень полезного сигнала можно повысить, сместившись в длинноволновую область, или увеличив спектральный диапазон регистрируемого сигнала.

Оценку чувствительности методики измерения накопления водорода в осаждения материалов ОПЭ методом LIA-QMS можно сделать на основании данных работы [65], где была продемонстрирована возможность измерения парциального давления водорода и дейтерия (H/D) при давлениях до 4×10^{-7} Па со стандартными отклонениями $\pm 16.5\%$ путем регистрации эмиссионных линий изотопов атомарного водорода H_{α} 656.28 нм и дейтерия D_{α} 656.10 нм в разряде Пеннинга. В пересчете на объем камеры TRT около 100 м^3 это соответствует $\sim 10^{16}$ атомов. Для этого в [65] для измерения базового давления использовался вакуумметр Alcatel CF2P на основе пеннинговского разряда и спектрометр высокого разрешения SPT-DDHR-04 со временем интегрирования CCD камеры 1 с. Оценки, сделанные для бериллиевых осадений, показывают, что облучение лазерными импульсами с длительностью

импульсов несколько нс и короче с плотностью энергии 10 Дж/см² обеспечит скорость абляции более 1 мкм за один импульс. Использование стандартного лазера с энергией в импульсе 1 Дж,

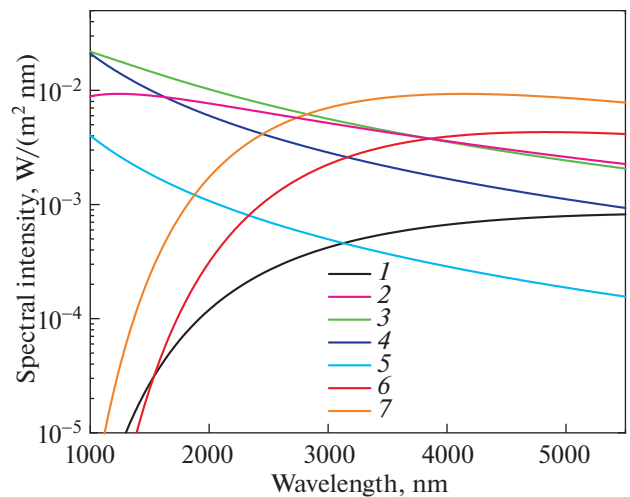


Рис. 4. Сравнение спектральной интенсивности тормозного излучения (ТИ) и планковского излучения нагретой поверхности стенки токамака TRT. Расчет приводится для сигналов, регистрируемых диагностикой ИК-термографии для нескольких значений электронной температуры $T_e = 0.1$ – 10000 эВ, и 2-х температур стенки – 600 К и 700 К. 1 – ТИ, $T_e = 0.1$ эВ, 2 – ТИ, $T_e = 0.5$ эВ, 3 – ТИ, $T_e = 1$ эВ, 4 – ТИ, $T_e = 100$ эВ, 5 – ТИ, $T_e = 10000$ эВ, 6 – Планковское излучение, $T = 600$ К, 7 – Планковское излучение, $T = 700$ К.

длительностью импульса несколько нс и частотой повторения 100 Гц позволит проводить измерение изотопов водорода, накопленных в осадениях толщиной около 100 мкм с поверхностной плотностью от 10^{17} атомов/см² и выше за время 1 с, сравнимое со временем откачки вакуумного объема TRT. При толщине осадений ~10 мкм чувствительность вырастет до 10^{16} атомов/см² при условии реализации системы сканирования лазерным лучом поверхности ОПЭ.

Одной из задач при разработке комплекса диагностик первой стенки является поиск путей интеграции с другими оптическими диагностиками. В частности, рассматривается возможность совмещения системы регистрации метода LIAS/LIDS с системой спектрального анализа краевой плазмы диагностики томсоновское рассеяние/ЛИФ (лазерно-индуцированная флюоресценция) в диверторе для исследования динамики накопления топлива в ходе разрядов [66]. Сократить затраты на реализацию комплекса также планируется путем совмещения элементной базы диагностического комплекса, главным образом за счет его наиболее дорогостоящей части — лазерных систем. Так, один лазер с наносекундной длительностью импульса может использоваться в диагностиках LIBS/LIAS/LIA-QMS и служить лазером накачки для узкополосного параметрического генератора света диагностики ДЦГ, а комбинированный постоянный/миллисекундный лазер можно использовать одновременно в диагностиках LIDS/LID-QMS, активной ИК-термографии и LIDAR.

Как показывает опыт разработки оптических диагностик для токамака ITER, необходимость поддержания работоспособности внутривакуумной оптики является одним из основных факторов, определяющих дизайн, как самих оптических элементов, так и систем сбора света в целом. Наиболее проработанный вариант — использование металлических молибденовых или родиевых монокристаллических или нанокристаллических зеркал в непосредственной близости от плазмы. В удаленных областях возможно использование защищенных высокоотражающих зеркал из серебра и алюминия или многослойных диэлектрических зеркал. Для защиты оптических элементов диагностик первой стенки TRT от осадений продуктов эрозии ОПЭ, планируется использовать механические заслонки на основе пьезокерамических или биметаллических актюаторов. Для систем, открытых на плазму во время разрядов в токамаке рассматривается возможность оснащения узлов первых зеркал системой плазменной очистки на основе ВЧ-разряда. Подобные системы, предназначенные для очистки металлических и диэлектрических осадений в присутствии магнитного поля и без него, активно разрабаты-

ваются для большинства оптических диагностик в ITER [67, 68].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для токамака TRT предложен проект комплекса диагностик первой стенки. Задачи комплекса — наблюдение за состоянием обращенных к плазме элементов (ОПЭ) и мониторинг тепловых потоков на элементы облицовки. Наблюдение за состоянием ОПЭ подразумевает контроль целостности обращенной к плазме облицовки для предотвращения ее разрушения, исследование эволюции механических разрушений с течением времени, включая возникновение модифицированных и рекристаллизованных слоев, а также измерение состава, толщины осадений и содержания в них изотопов водорода. Мониторинг поверхности ОПЭ позволит исследовать как постепенные изменения ОПЭ, так и процессы на поверхности непосредственно во время разрядов. Последнее подразумевает контроль источников и потоков десорбции запасенного в стенках газа, что принципиально важно для достижения оптимальных характеристик плазменного разряда. Использование предлагаемого диагностического комплекса направлено также на изучение эффективности процедуры кондиционирования стенок, обоснование периодичности и длительности дегазации установки. Измерение температурных полей на поверхности ОПЭ в режиме реального времени планируется использовать как для получения информации о тепловой нагрузке на стенку, так и в качестве одного из индикаторов в системе обратной связи управления горением плазмы. В частности, управление мощностью нагрева и/или инжекцией нейтрального газа в область дивертора по сигналу системы мониторинга температуры в наиболее нагруженных зонах рассматривается, как один из вариантов реализации такой обратной связи.

Для решения поставленных задач необходимо обеспечить обзор всей поверхности ОПЭ во время разрядов и между ними, и, одновременно, предусмотреть возможность детального исследования поверхности, в областях преимущественного напыления и эрозии. В качестве обзорных диагностик предлагается использовать частотно/амплитудно-модулированный лазерный радар (AM-, FM-LIDAR), а также активную и пассивную ИК-термографию. Для более детального исследования поверхности и приповерхностных слоев планируется дополнительно задействовать диагностики двухчастотной цифровой голографии (ДЦГ) и лазерные методы исследования осадений, основанные на лазерной десорбции и абляции (LIBS, LIAS, LIDS, LIA-QMS/LID-QMS). Большинство из данных диагностик до настоящего времени не использовалось в условиях тока-

маков и находятся на стадии проектирования для реализации в ИТЕР. Разработка и внедрение такого диагностического комплекса требует макетирования и апробации каждой из диагностик в условиях, близких к ожидаемым в токамаке с учетом требований, связанных с их интеграцией в единый комплекс. Такая работа уже ведется совместными усилиями коллективов ФТИ им. Иоффе и МИФИ. В рамках данной работы планируется установить и провести апробацию совмещенной диагностики LIA-QMS/LIBS на установке Глобус-М2 с последующей их интеграцией с диагностикой ДЦГ.

Формулировка задач при разработке комплекса диагностик первой стенки TRT (Раздел 2) выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор № 0723-2020-0043). Выбор и обоснование физических методов выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор № 0034-2019-0001). Разработка вариантов размещения диагностического комплекса на токамаке, а также анализ ожидаемой точности измерения (разд. 4) выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-12-00360).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *De Temmerman G., Hirai T., Pitts R.A.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60. P. 044018. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aaaf62>
2. *Schweer B., Huber A., Sergienko G., Philipps V., Irrek F., Esser H.G., Samm U., Kempenaars M., Stamp M., Gowers C., Richards D.* // J. Nucl. Mater. 2005. V. 337–339. P. 570–574. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.10.156>
3. *Philipps V., Malaquias A., Hakola A., Karhunen J., Maddaluno G., Almaviva S., Caneve L., Colao F., Fortuna E., Gasior P., Kubkowska M., Czarnecka A., Laan M., Lissovski A., Paris P., van der Meiden H.J., Petersson P., Rubel M., Huber A., Zlobinski M., Schweer B., Gierse N., Xiao Q., Sergienko G.* // Nucl. Fusion. 2013. V. 53. 093002. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/9/093002>
4. *Liu P., Wu D., Sun L.Y., Zhao D.Y., Hai R., Li C., Ding H., Hu Z.H., Wang L., Hu J.S., Chen J.L., Luo G.N.* // Fusion Engineering and Design. 2017. V. 118. P. 98. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.03.021>
5. *Karhunen J., Hakola A., Likonen J., Lissovski A., Laan M., Paris P.* // J. Nucl. Mater. 2015. V. 463. P. 931. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.10.028>
6. *Loarte A.* ITER technical report ITR-20-008 “Required R&D in Existing Fusion Facilities to Support the ITER Research Plan”.
7. *Pintsuk G., Bobin-Vastra I., Constans S., Gavila P., Rödiger M., Riccardi B.* // Fusion Eng. Des. 2013. V. 88. P. 1858. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.05.091>
8. *Кукушкин А.С., Пшенов А.А.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 12. С. 1123.
9. *Pitts R.A., Bonnin X., Escourbiac F., Frerichs H., Gunn J.P., Hirai T., Kukushkin A.S., Kaveeva E., Miller M.A., Moulton D., Rozhansky V., Senichenkov I., Sytova E., Schmitz O., Stangeby P.C., De Temmerman G., Veselova I., Wiesen S.* // Nuclear Materials and Energy. 2019. V. 20. P. 100696. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2019.100696>
10. *Красильников А.В.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. С. 970–985.
11. *Медведев С.Ю., Мартынов А.А., Коновалов С.В., Леонов В.М., Лукаш В.Э., Хайрутдинов Р.Р.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 998.
12. *Loewenhoff T., Linke J., Pintsuk G., Thomser C.* // Fusion Eng. Des. 2012. V. 87. P. 1201. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2012.02.106>
13. *Thomser C.V., Bailescu S., Brezinsek J.W., Coenen H., Greuner T., Hirai J., Linke C.P., Lungu H., Maier G., Matthews Ph., Mertens R., Neu V., Philipps V., Riccardo M., Rubel C., Ruset A., Schmidt I., Uytendhouwen, and JET EFDA contributors* // Fusion Sci. Technol. 2012. V. 62. P. 1. <https://doi.org/10.13182/FST12-A14103>
14. *Coenen J.W., Krieger K., Lipschultz B., Dux R., Kallenbach A., Lunt T., Mueller H.W., Potzel S., Neu R., Terra A., and the ASDEX Upgrade and TEXTOR Teams* // Evolution of Surface Melt Damage, its Influence on Plasma Performance and Prospects of Recovery. PS-FC/JA-12-72 // 2013, May 10, Plasma Science and Fusion Center Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA 02139 USA, (I-1).
15. *Мазуль И.В., Гиниятулин Р.Н., Кавин А.А., Лутуновский Н.В., Маханьков А.Н., Пискарев П.Ю., Танчук В.Н.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 12. С. 1103.
16. *Alimov V.Kh., Shu W.M., Roth J., Sugiyama K., Lindig S., Balden M., Isobe K., Yamanishi T.* // Phys. Scr. 2009. V. T138. 014048. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2009/T138/014048>
17. *Kajita S., Sakaguchi W., Ohno N., Yoshida N., Saeki T.* // Nucl. Fusion. 2009. V. 49. 095005. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/49/9/095005>
18. *Будаев В.П.* // ВАИТ. Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. № 4.
19. *Baldwin M.J., Doerner R.P., Nishijima D., Buchenauer D., Clift W.M., Causey R.A., Schmid K.* // J. Nucl. Mater. 2007. V. 363–365. P. 1179. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.01.151>
20. *Cui S., Simmonds M., Qin W., Ren F., Tynan G.R., Doerner R.P., Chen R.* // J. Nucl. Mater. 2017. V. 486. P. 267–73. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.01.023>
21. *Corr C.S., Ryan S.O., Tanner C., Thompson M., Bradley J.E., De Temmerman G., Elliman R.G., Kluth P., Riley D.* // Nucl. Mater. Energy. 2016. V. 12. P. 1336–41. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2017.04.012>
22. *Ueda Y., Coenen J.W., De Temmerman G., Doerner R.P., Linke J., Philipps V., Tsitron E.* // Fusion Eng. Des. 2014. V. 89. P. 901. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.02.078>

23. *Sakamoto M., Yuno M., Itoh S., Hanada K., Nakamura K., Zushi H., Jotaki E., Hasegawa M., Kulkarni S.V., Iyomasa A., Kawasaki S., Nakashima H.* // Nucl. Fusion. 2004. V. 44. P. 693.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/44/7/001>
24. *Lipschultz B., Coenen J.W., Barnard H.S., Howard N.T., Reinke M.L., Whyte D.G., Wright G.M.* // Nucl. Fusion. 2012. V. 52. P. 123002.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/52/12/123002>
25. *Вериков В.А., Вуколов Д.К., Кулешин Э.О., Медведев А.А.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2012. Вып. 4. С. 80.
26. *Heinola K., Widdowson A., Likonen J., Alves E., Baron-Wiechec A., Barradas N., Brezinsek S., Catarino N., Coad P., Koivuranta S., Krat S., Matthews G.F., Mayer M., Petersson P., JET Contributors* // Phys. Scr. 2016. T. 167. 014075.
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/T167/1/014075>
27. *Romazanov Y., Brezinsek S., Kirschner A., Borodin D., Ek-saeva A., Pitts R.A., W. Lisgo S., Anand H., Veshchev E., Neverov V.S., Kukushkin A.B., Alekseev A.G., Linsmeier C.* // Contrib. Plasma Phys. 2019. e201900149.
<https://doi.org/10.1002/ctpp.201900149>
28. *Alimov V.Kh., Yajima M., Masuzaki S., Tokitani M., LHD Experiment Group* // Fusion Eng. Des. 2019. V. 147. P. 111228.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.06.001>
29. *Krat S.A., Gasparyan Yu.M., Popkov A.S., Pisarev A.A.* // Vacuum. 2014. V. 105. P. 111–114.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2014.01.006>
30. *Eich T., Leonard A.W., Pitts R.A., Fundamenski W., Goldston R.J., Gray T.K., Herrmann A., Kirk A., Kallenbach A., Kardaun O., Kukushkin A.S., LaBombard B., Maingi R., Makowski M.A., Scarabosio A., Sieglin B., Terry J., Thornton A., ASDEX Upgrade Team and JET EFDA* // Nucl. Fusion. 2013. V. 53. P. 093031.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/9/093031>
31. *Houry M., Pocheau C., Aumeunier M.-H., Balarin C., Blanckaert K., Corre Y., Courtois X., Ferlay F., Gaspar J., Gazzotti S., Grosjean A., Loarer Th., Roche H., Saille A., Vives S., the WEST Team* // Fusion Eng. Des. 2019. V. 146A. P. 1104–1107.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.02.017>
32. *Hollmann E.M., Commaux N., Eidietis N.W., Lasnier C.J., Rudakov D.L., Shiraki D., Cooper C., Martin-Solis J.R., Parks P.B., Paz-Soldan C.* // Phys. Plasmas. 2017. V. 24(6). 062505.
<https://doi.org/10.1063/1.4985086>
33. *Courtois X., Aumeunier M.-H., Balarin C., Migozzi J.B., Houry M., Blanckaert K., Mouddean Y., Pocheau C., Saille A., Hugot E., Marcos M., Vives S., WEST Team* // Fusion Eng. Des. 2019. V. 146 B. P. 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.090>
34. *Chen M.W., Gong X.Z., Gan K.F., Wang L., Yuan Q.P., Wu K., Li K.D., Duan Y.M., Meng L.Y., Zhang B., Shu S.B., Zhang J.Y., Liu C., Liang R.R., Li C.J. and The EAST team* // Nucl. Fusion. 2020. V. 60. P. 076009.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab8c65>
35. *Guilhem D.* // Fus. Eng. Des. 74 (1). P. 879.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.08.021>
36. *F4E_D_2B7C62 – T008 D18* // Detailed trade-off with supporting prototyping evidence, ASE Optics.
37. *Menon M.M., Barry R.E., Skinner C.H., Gentile C.* // Proc. Symposium on Fusion Technology. 1999. Cat. No. 99CH37050.
<https://doi.org/10.1109/FUSION.1999.849833>
38. *ITER_D_2K3K7Y v1.0 – 57 – IVVS – “Design Description Document (DDD) for the IVVS Measurement System (MS)”*
39. *Skinner C.H., Gentile C.A., Menon M.M., Barry R.E.* // Nucl. Fusion. 1999. V. 39. P. 1081.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/39/9/301>
40. *Schars U., Jueptner W.* Digital Holography: digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques // Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2005.
41. *Pedrini G., Calabuig A., Jagannathan G., Kempnaars M., Vayakis G., Osten W.* // Applied Optics. 2019. V. 58. Issue 5. P. A147–A155.
<https://doi.org/10.1117/12.2550453>
42. *Eich T., Sieglin B., Scarabosio A., Fundamenski W., Goldston R.J., and Herrmann A.* (ASDEX Upgrade Team) // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. 215001.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.215001>
43. *Reichle R., Andrew P., Counsell G., Drevon J.-M., Encheva A., Janeschitz G., Johnson D., Kusama Y., Levesy B., Martin A., Pitcher C.S., Pitts R., Thomas D., Vayakis G., and Walsh M.* // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. 10E135.
<https://doi.org/10.1063/1.3491199>
44. *Courtois X., Sortais C., Melyukov D., Gardarein J.L., Semerok A., Grisolia Ch.* // Fus. Eng. Des. 2011. V. 86. P. 1714.
45. *Gasparyan Y., Bulgadaryan D., Efimov N., Efimov V., Krat S., Popova M., Sinelnikov D., Vovchenko E., Dmitriev A., Eleis D., Mukhin E., Razdobarin A., Minaev V., Novokhatsky A., Sakharov N., Varfolomeev V.* // Fusion Engineering and Design. 2021. V. 172. P. 112882.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112882>
46. *Schweer B., Beyene G., Brezinsek S., Gierse N., Huber A., Irrek F., Kotov V., Philipps V., Samm U., Zlobinski M.* // Phys. Scr. 2009. V. T138. P. 014008.
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/2009/T138/014008>
47. *Maddaluno G., Almaviva S., Caneve L., Colao F., Lazic V., Laguardia L., Gasior P. and Kubkowska M.* // Nucl. Mater. Energy. 2019. V. 18. P. 208.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2018.12.029>
48. *Wu H., Li C., Wu D., Liu J., He Z., Li Q., Yuan S., Cui X., Hai R. and Ding H.* // J. Anal. At. Spectrom. 2021. V. 36. P. 2074.
<https://doi.org/10.1039/D1JA00196E>
49. *Zaytsev S.M., Popov A.M. and Labutin T.A.* // Spectrochim. Acta – Part B At. Spectrosc. 2019. V. 158. P. 105632.
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2019.06.002>
50. *Paris P., Piip K., Hakola A., Laan M., Aints M., Koivuranta S., Likonen J., Lissovski A., Mayer M., Neu R., Rohde V. and Sugiyama K.* // Fusion Eng. Des. 2015. V. 98. P. 1349.
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/T167/1/014043>
51. *Almaviva S., Caneve L., Colao F., Maddaluno G.* // Fusion Eng. Des. 2019. V. 146. P. 2087.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.109>

52. *Marenkov E.D., Tsygvintsev I.P., Gasparyan Y.M. and Stepanenko A.A.* // Nucl. Mater. Energy. 2021. V. 28. P. 101029.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2021.101029>
53. *Rubel M., Coad J.P., Widdowson A., Matthews G.F., Esser H.G., Hirai T., Likonen J., Linke J., Lungu C.P., Mayer M., Pedrick L., Ruset C.* JET-EFDA Contributors // J. Nucl. Mater. 2013. V. 438. P. S1204–S1207.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.266>
54. *Hakola A., Koivuranta S., Likonen J., Herrmann A., Maier H., Mayer M., Neu R., Rohde V.* ASDEX Upgrade Team. // J. Nucl. Mater. 2015. V. 463. P. 162.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.11.034>
55. *Lagoyannis A., Tsavalas P., Mergia K., Provatas G., Triantou K., Tsompopoulou E., Rubel M., Petersson P., Widdowson A., Harissopulos S., Mertzimekis T.J.* and the JET contributors // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. P. 076027.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6ec1>
56. *Likonen J., Heinola K., De Backer A., Baron-Wiechec A., Catarino N., Jecu I., Ayres C.F., Coad P., Koivuranta S., Krat S., Matthews G.F., Mayer M., Widdowson A.* JET Contributors // Nucl. Mater. Energy. 2019. V. 19. P. 166.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2019.02.031>
57. *Krat S., Mayer M., Coad J.P., Lungu C.P., Heinola K., Baron-Wiechec A., Jecu I., Widdowson A.* JET Contributors // Nucl. Mater. Energy. 2021. V. 29. P. 101072.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2021.101072>
58. *Krat S., Mayer M., Bykov I., Lungu C.P., de Saint Aubin G., Widdowson A., Carvalho I.S.* JET contributors // Nucl. Mater. Energy. 2017. V. 11. P. 20.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2017.02.026>
59. *Mayer M., Krat S., Coad J.P., Hakola A., Likonen J., Lindig S., Widdowson A.* JET-EFDA Contributors // J. Nucl. Mater. 2013. V. 438. P. S780–S783.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.167>
60. *Krat S., Mayer M., von Toussaint U., Coad P., Widdowson A., Gasparyan Y., Pisarev A.* JET contributors // Nucl. Mater. Energy. 2017. V. 12. P. 548–552.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.12.005>
61. *Coad J.P., Hole D.E., Rubel M., Widdowson A., Vince J.* // Phys. Scr. 2009. V. T138. P. 014023.
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/2009/T138/014023>
62. *Tomohiko Ushikia, Ryota Imazawaa, Hidetoshi Murakamia, Kosuke Shimizua, Tatsuo Sugieb, Takaki Hatae* // Fus. Eng. Des. V. 168. 112665.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112665>
63. *Лишица В.С., Мухин Е.Е., Кадомцев М.Б., Кукушкин А.Б., Кукушкин А.С., Курскиев Г.С., Левашова М.Г., Толстяков С.Ю.* // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 2. С. 157.
64. *Леонов В.М., Коновалов С.В., Жоголев В.Е., Кавин А.А., Красильников А.В., Куянова А.Ю., Лукаша В.Э., Мишеев А.Б., Хайрутдинов Р.Р.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. С. 986.
65. *Mukhin E.E., Andrew P., Anthoine A.D., Bazhenov A.N., Barnsley R., Bukreev I.M., Bukhovets V.L., Chernakov A.P., Gorodetsky A.E., Kochergin M.M., Koval A.N., Kukushkin A.B., Kukushkin A.S., Kurskiev G.S., Levashova M.G., Litvinov A.E., Lituovsky V.N., Markin A.V., Mazul I.V., Masyukevich S.V., Miroshnikov I.V., Nemov A.S., Novokhatsky A.N., Razdobarin A.G., Sherstnev E.V., Samsonov D.S., Semenov V.V., Smirnov A.S., Temmerman G.D., Tolstyakov S.Y., Zalavutdinov R.K., Walsh M.J.* // Nucl. Fusion. 2016. V. 56. P. 036017.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/56/3/036017>
66. *Мухин Е.Е., Толстяков С.Ю., Курскиев Г.С., Жильцов Н.С., Коваль А.Н., Соловей В.А., Горбунов А.В., Горшков А.В., Асадулин Г.М., Корнев А.Ф., Макаров А.М., Богачев Д.Л., Бабинов Н.А., Самсонов Д.С., Раздобарин А.Г., Баженов А.Н., Букреев И.М., Дмитриев А.М., Елец Д.И., Сениченков В.А., Терещенко И.Б., Варшавчик Л.А., Ходунов И.А., Чернаков Ан.П., Марчий Г.В., Николаенко К.О., Ермаков Н.В.* // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 8. С. 722.
67. *Moser L., Marot L., Steiner R., Newman M., Widdowson A., Ivanova D., Likonen J., Petersson P., Pintsuk G., Rubel M., Meyer E. and JET Contributors* // Phys. Scr. 2016. V. T167. P. 014069
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/T167/1/014069>
68. *Razdobarin A.G., Dmitriev A.M., Bazhenov A.N., Bukreev I.M., Kochergin M.M., Koval A.N., Kurskiev G.S., Litvinov A.E., Masyukevich S.V., Mukhin E.E., Samsonov D.S., Semenov V.V., Tolstyakov S.Yu., Andrew P., Bukhovets V.L., Gorodetsky A.E., Markin A.V., Zakharov A.P., Zalavutdinov R.Kh., Chernakov P.V., Chernozumskaya T.V., Kobelev A.A., Miroshnikov I.V., and Smirnov A.S.* // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. P. 093022.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/9/093022>