

ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ДИАГНОСТИКИ ИК-ТЕРМОГРАФИЯ В ТОКАМАКЕ С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ ТРТ

© 2024 г. А. Г. Раздобарин^{а,б,*}, Я. Р. Шубин^а, Д. Л. Богачев^б, Д. И. Елец^{а,б}, О. С. Медведев^{а,б},
Е. Е. Мухин^а, Л. А. Снигирев^а

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

^бООО “Спектрал-Тех”, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: Aleksey.Razdobarin@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 29.01.2024 г.

После доработки 15.02.2024 г.

Принята к публикации 18.02.2024 г.

Рассмотрены варианты реализации диагностической системы ИК-термография в установке ТРТ. Предложено два варианта оптической схемы измерения температуры первой стенки и диверторных мишеней: широкоугольная система, совмещенная с двумя диверторными каналами и четырехканальная система обзора. Проведено численное моделирование оптического разрешения обеих систем и уровней собираемого сигнала. На основании проведенных расчетов сделаны выводы о соответствии систем требованиям к измерениям температуры обращенных к плазме элементов ТРТ. Рассмотрены источники ошибки измерения температуры, сделана оценка величины ошибки, обусловленной отражением исследуемой поверхностью излучения обращенных к плазме элементов конструкций. Также обсуждаются вопросы калибровки диагностики ИК-термографии.

Ключевые слова: токамак ТРТ, ИК-термография, первая стенка

DOI: 10.31857/S0367292124040113, **EDN:** QCSKCO

1. ВВЕДЕНИЕ

Тепловая нагрузка на конструкционные материалы токамаков является одним из факторов, влияющих на возможность достижения требуемых параметров плазмы в режиме длинных и квазинепрерывных импульсов. Для мониторинга и управления процессами взаимодействия плазмы со стенкой в современных плазменных машинах широко используется метод ИК-термография. Суть метода заключается в измерении динамики температурных полей на поверхности взаимодействующих с плазмой элементов (ОПЭ) с последующим восстановлением плотности тепловых потоков на стенку. Можно выделить две основные функции данной диагностики:

— защита машины от чрезмерных тепловых нагрузок во избежание повреждения ОПЭ, возникновения глубоких трещин и/или утечки воды, обратная связь системы управления плазмой;

— изучение взаимодействия плазма-стенка для исследования физики пристеночного слоя, мониторинга изменений, происходящих в материале ОПЭ под действием плазменной нагрузки и оптимизации плазменных сценариев.

Системы измерения температуры в реальном времени, направленные на решение обеих задач уже

успешно опробованы на целом ряде токамаков. В частности, в экспериментах на EAST была продемонстрирована возможность контролируемого перехода в режим детачмента и его поддержания путем импульсного напуска нейтрального газа по управляющему сигналу диагностики ИК-термография [1]. В токамаке Tore-Supra данные температурных измерений использовались в цепи управления мощностью дополнительного нагрева для ограничения тепловых нагрузок на антенны [2]. При помощи метода ИК-термография были получены данные о ширине пристеночного слоя λ_q [3], исследовались краевые эффекты, обусловленные профилированием облицовочных пластин [4], а также были сделаны оценки тепловой энергии, выносимой на стенку убегающими электронами [5].

Требования к температурным измерениям, а следовательно, и реализация метода будут зависеть от того, какая задача диагностики является первичной. Для обеспечения безопасной работы установки требуется полностью надежный метод мониторинга в реальном времени с обратной связью с системой управления плазмой во избежание повреждения ОПЭ. В таком случае от диагностики требуются хорошее временное разрешение и максимальная область обзора. Задачи исследования физики пристеночного слоя

и взаимодействия плазма-стенка требуют высокого пространственного и временного разрешения в выделенных областях первой стенки и диверторных пластин. В данной работе предложены два варианта реализации системы ИК-термографии, оптимизированные под решение данных задач соответственно.

В статье также рассматриваются общие для обоих подходов источники ошибок и методы калибровки диагностики. Реализация диагностики ИК-термографии в цельнометаллических токамаках, каким является токамак с реакторными технологиями ТРТ должна учитывать дополнительные источники ошибок измерения, обусловленные многократными отражениями излучения внутренней нагретой поверхности токамака. Как показано в работах [6–8], эффекты переотражения теплового излучения в цельнометаллических токамаках могут приводить к локальным ошибкам в измерении температуры и, как следствие, генерации ложных сигналов в системе управления токамаком, использующей данные диагностики ИК-термография в качестве обратной связи. Разработка методов калибровки, проводимой непосредственно в ходе плазменных импульсов, и численное моделирование распределения температурных полей с учетом многократных переотражений теплового излучения призваны уменьшить данную ошибку и повысить надежность измерений температуры.

2. РАЗМЕЩЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ЭКВАТОРИАЛЬНОМ ПАТРУБКЕ

Необходимость максимального обзора и в то же время высокого пространственного разрешения в от-

дельных областях первой стенки требует использования нескольких оптических каналов. Основным рассматриваемым вариантом является компоновка оптической схемы в экваториальном патрубке. На данном этапе работы мы отказались от размещения диагностической системы в диверторном порту, поскольку текущая геометрия диверторных касет токамака ТРТ затрудняет размещение оптических элементов под куполом в существующих вырезах касет. Ниже приведено два варианта реализации оптической схемы. Первый представляет собой широкоугольный объектив, совмещенный с 2 диверторными каналами, которые обладают более высоким разрешением в наиболее нагруженных областях дивертора. Второй вариант скомпонован по 4-канальной схеме и обеспечивает существенно более высокое разрешение на первой стенке. Оба варианта используют внутривакуумную зеркальную оптику и спроектированы с учетом размещения в порту совместно с комплексом диагностик первой стенки [9].

2.1. Широугольная система, совмещенная с двумя диверторными каналами

Широкоугольная система обзора обладает угловым полем 50° и предназначена для получения наиболее общего представления о процессах, происходящих в вакуумной камере. Система оптимизирована в широком спектральном диапазоне: от 450 нм до 4 мкм — и таким образом позволяет проводить наблюдения как в ИК, так и в видимом спектральном диапазонах. Входной объектив состоит из одного сферического и четырех плоских зеркал (вставка на рис. 1а). При

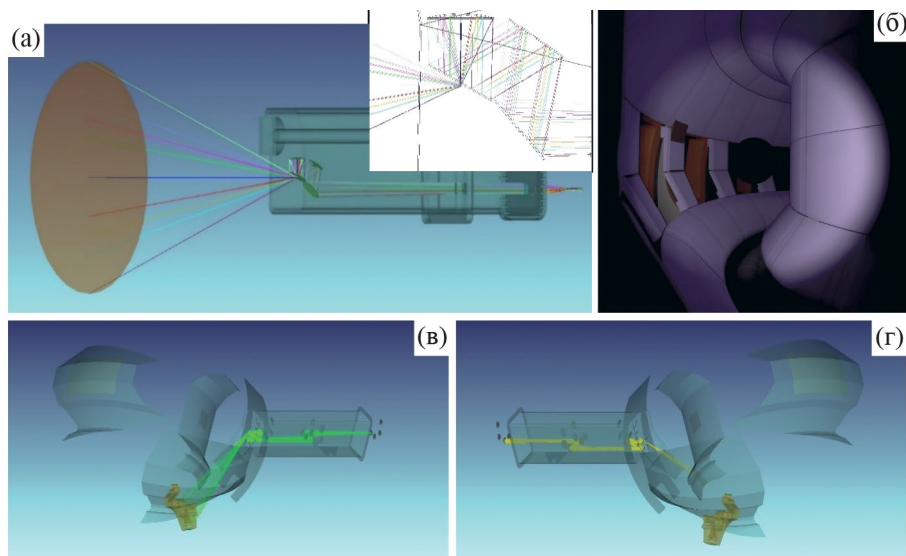


Рис. 1. Обзорный широкоугольный канал диагностики ИК-термография, совмещенный с двумя диверторными каналами: а) размещение в экваториальном порту широкоугольного объектива (на вставке показан крупный план входного объектива); б) поле обзора широкоугольной системы; в, г) размещение в экваториальном порту оптических каналов обзора наружной и внутренней диверторных мишеней соответственно

этом широкий угол обзора удалось достичь только при наличии несущественного экранирования по центру поля, обусловленной конфигурацией зеркал входного объектива (рис. 1б). Для получения более четкого изображения области дивертора, в которой происходит основной выход мощности на стенку в систему добавлено два дополнительных канала, передающих изображение внешней и внутренней мишеней дивертора (рис. 1в, г). Размеры области обзора диверторных каналов приведены в табл. 1

Для всех трех каналов были спроектированы тестовые оптические схемы выходных объективов и проведен расчет оптического разрешения и уровня сигнала. Для полноценного описания разрешающей способности диагностики необходимо учитывать дифракционные эффекты, которые в длинноволновом диапазоне проявляются сильнее геометрических aberrаций. Представление о разрешении можно по-

лучить, исследуя модуль комплексной оптической передаточной функции (ОПФ) исходного синусоидального сигнала с частотой, обратной к интересующему разрешению. Приведенный ниже анализ был выполнен в программном пакете ZEMAX для длины волны 4 мкм. Карты контраста построены на основе вычисления усредненного по тангенциальному (вертикальное разрешение) и сагиттальному (горизонтальное разрешение) сечениям модуля ОПФ для различных пространственных частот. Они были рассчитаны методом Фурье-преобразования сетки из 64×64 лучей в выходном зрачке. Приблизительное представление о минимальном гарантированном разрешении каналов можно получить, взяв за нижнюю отсечку допустимого контраста величину 0.2. Тогда пространственные частоты, соответствующие поверхностям, расположенным выше уровня 0.2 можно считать разрешимыми. Карты контраста для обзорного и диверторных каналов приведены на рис. 2.

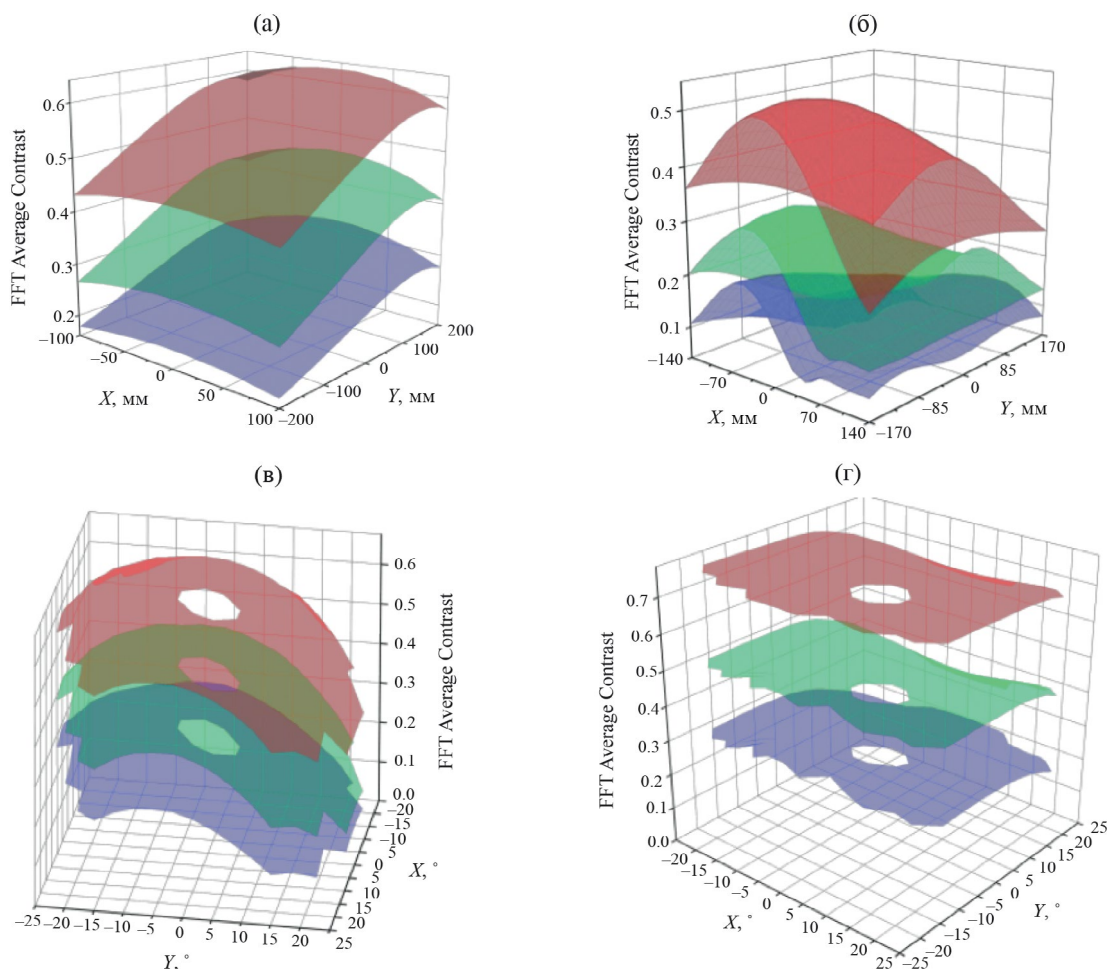


Рис. 2. Карта контраста видимого поля: а) — внутренняя мишень дивертора; б) — внешняя мишень дивертора; в) — обзорный канал на дистанции наблюдения 2 м; г) — обзорный канал на дистанции наблюдения 4.5 м. Разным цветам соответствуют различные пространственные частоты: R — красная, G — зеленая, B — синяя поверхности
а) R — 1 лин/мм, G — 1.5 лин/мм, B — 2 лин/мм; б) R — 0.5 лин/мм, G — 1 лин/мм, B — 1.5 лин/мм; в) R — 0.2 лин/мм, G — 0.3 лин/мм, B — 0.4 лин/мм; г) R — 0.05 лин/мм, G — 0.1 лин/мм, B — 0.15 лин/мм

Таблица 1. Оптические каналы диагностики ИК-термография

Номер канала	Область обзора, номер ряда панели	Размеры области обзора, Ш×В, мм ²
1	Внутренняя мишень дивертора	200×400
2	Наружная мишень дивертора	Мишень целиком
3	Центральная колонна, панель в ряду 2	400×400
4	Наружная стенка, панель в ряду 10	1400×1000

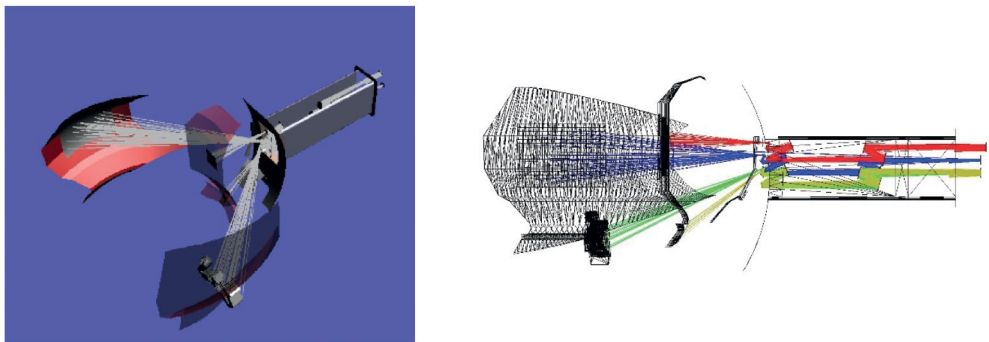


Рис. 3. Четырехканальная схема диагностики ИК-термография ТРТ

Для диверторных каналов зависимость строилась от линейных координат поля наблюдения, в то время как для обзорного канала — от угловых координат.

Полученные карты контраста для широкоугольной системы (рис. 2 в, г) показывают, что на средней дистанции наблюдения ~2 м от первых зеркал на длине волны 4 мкм разрешение не будет превосходить 0.4 линии на мм, то есть размер минимально разрешаемого объекта составит не менее 2.5 мм. При этом при наблюдении объектов, расположенных на дистанции 4.5 м разрешение существенно ниже — до 0,15 линий на мм. При этом, данная оценка не учитывает наклон мишени относительно линии наблюдения. С учетом наклона разрешение уменьшится до 0.1 линий на 1 мм. В диверторных каналах разрешение заметно выше. На внутренней мишени практически по всей площади оно не менее 2 линий на мм. На внешней мишени из-за специфических углов наклона предметной плоскости к оси оптической системы разрешение достаточно сильно меняется от 1.5 линий на мм до 0.5 линий на 1 мм на краю изображения.

2.2. Четырехканальная система

На рис. 3 показан второй вариант реализации системы измерения температуры, обеспечивающий более высокое разрешение областей первой стенки и центральной колонны по сравнению с обзорным каналом. Измерения температуры осуществляется по 4-канальной схеме: два канала — обзор внешней и внутренней мишеней дивертора и два для наблюдения за наиболее нагруженными защитными

панелями первой стенки — стартовым и защитным лимитерами (панели в рядах 2 и 10, соответственно [10]). Все четыре канала скомпонованы по одной и той же схеме и отличаются только ориентацией первого зеркала (рис. 3 справа). Диверторные каналы в данном варианте реализации идентичны рассмотренным выше в первом варианте, где они дополняют обзорный канал.

Размеры и расположение областей, в которых предполагается вести измерение температуры приведены в табл. 1. Карты контраста изображения участка центральной колонны, показанные на рис. 4,

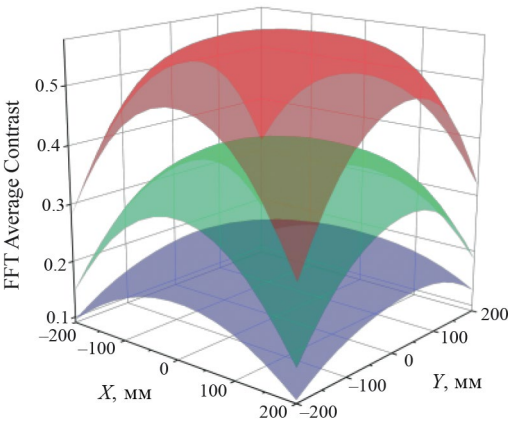


Рис. 4. Карта контраста видимого поля области на центральной колонне. Разным цветам соответствуют различные пространственные частоты: R — красная, G — зеленая, B- синяя поверхности R — 1.0 лин/мм, G — 1.5 лин/мм, B — 2.0 лин/мм.

позволяют говорить о максимальном разрешении порядка 2 линий на мм в центре и 1.5—1 линий на мм на краях.

3. УРОВЕНЬ СИГНАЛА И ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ДИАГНОСТИКИ

Временное разрешение измерения температуры определяется в первую очередь требуемым временем накопления сигнала (экспозиции). Время экспозиции, необходимое для надежной регистрации светового потока зависит от принципа регистрации, реализованного в диагностике. Ниже приведен расчет уровня сигнала на детекторе для системы регистрации, основанной на одновременном измерении двух спектральных интервалов теплового излучения. В данном подходе предлагается использовать две ИК-камеры с полосовыми фильтрами на разные длины волны, как показано на схеме на рис. 5. Преимущества такого подхода по сравнению с измерением интегрального теплового потока обсуждаются в разд. 4.

Для оценки разрешения предложенной диагностической схемы по времени был проведен анализ энергетики собираемого сигнала в зависимости от температуры стенки. Как известно, яркость в оптической системе модулируется только поглощением оптических элементов, поэтому возможно сразу получить значение яркости на детекторах. По известной выходной числовой апертуре (NA) системы сбора света рассчитывается телесный угол, стягиваемый пикселями детектора

$$\Omega = \pi \cdot NA^2. \quad (1)$$

Далее, предполагая характерный размер пикселей, легко получить мощность на 1 пиксель. Расчет потока фотонов на матрицу детектора проводился для случая матрицы размером 1000×1000 пикселей и спектральной ширины регистрируемого сигнала — 100 нм. Для оценки интенсивности излучения спектральная планковская яркость (2) (с учетом коэффициента серости вольфрама при комнатной температуре $\varepsilon = 0.1$) интегрировалась по длинам волн от 4 до 4.1 мкм.

$$B_\lambda(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda} \cdot \frac{\varepsilon}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \quad (2)$$

Зависимость потока фотонов на матрицу детектора от измеряемой температуры внутреннего дивертора показана на рис. 6.

Для ИК-камер с темновым шумом в несколько десятков $\bar{e}$ и квантовой эффективностью ~ 30 —50% надежно измеряемый сигнал $\sim 10^4$ фотонов на один пиксель детектора. Достижимое разрешение по времени для обеих рассматриваемых схем мож-

но оценить из рисунка 6, разделив 10^4 на величину фотонного потока при данной температуре. Для температуры 200 °С минимально необходимое время экспозиции для всех рассматриваемых каналов составляет менее 0.1 мс. Следует также отметить, что в случае использования схемы детектирования, основанной на измерении интегрального теплового потока с поверхности, чувствительность методики, будет заметно выше, а требуемое время экспозиции — меньше.

Очевидной проблемой в диверторных каналах является большие градиенты температуры. Так, в области пересечения сепаратрисы с мишенью плотность потока теплового излучения может в сотни раз превышать плотность потока в более холодных областях, что потребует существенного увеличения динамического диапазона измерительной системы и снизит точность измерения. Наиболее рациональным в таком случае будет разделить собираемое излучение на несколько каналов и использовать разные системы детектирования для измерения высокой и низкой температур.

4. ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И КАЛИБРОВКА

В общем виде ошибки измерения температуры ОПЭ методом ИК-термография могут быть обусловлены следующими факторами:

1. Неизвестная величина коэффициента серости, и его температурная зависимость.
2. Неизвестная спектральная характеристика оптической системы сбора света, и ее изменение с течением времени.
3. Излучение плазмы.
4. Отраженное излучение.

Значение величины коэффициента серости принципиально необходимо при определении температуры путем измерения интегральной интенсивности планковского излучения нагретой поверхностью. Данный метод реализован в большинстве коммерчески доступных ИК-камер, корректные измерения которыми требуют предварительной калибровки при известной температуре объекта. В условиях токамак-реактора поверхность стенки может быть неоднородна и иметь разные коэффициенты серости в разных областях [11]. Учесть это можно, регулярно проводя калибровочные измерения по всей поверхности стенки при известной ее температуре, например, во время прогрева в ходе процедур дегазации. Другой способ — определять температуру путем измерения спектрального отношения интенсивности излучения с использованием двух ИК-камер с полосовыми фильтрами на разные длины волны (рис. 5). Данная схема обеспечивает

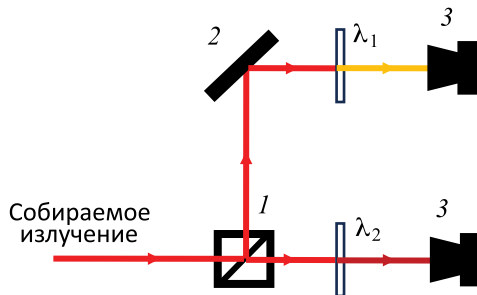


Рис. 5. Схема регистрации спектрального отношения Планковского излучения на основе двух ИК-камер. Символами λ_1 и λ_2 на схеме отмечены полосовые фильтры на соответствующие длины волн 1 — светоделительный кубик; 2 — зеркало; 3- ИК-камеры

абсолютные изменения температуры вне зависимости от абсолютной величины коэффициента серости и его вариации с ростом температуры. В то же время при измерении на двух длинах волн необходимо учитывать спектральную зависимость коэффициента серости, а также ее изменение при взаимодействии поверхности с плазмой — например вследствие эрозии или осаждения пленок. Для измерения спектральной зависимости коэффициента серости можно использовать отдельный канал измерения, проводя калибровку при помощи ИК-спектрометра во время прогрева стенки. Такой подход, в частности, используется в диагностике ИК-термографии дивертора ИТЭР.

Изменение спектральной характеристики оптической системы сбора света как еще один источник ошибки может возникнуть вследствие воздействия потоков частиц на оптические элементы, расположенные вблизи плазмы, либо после

аварийных событий, таких как прорыв контуров водяного охлаждения. При этом основным механизмом деградации оптических элементов является их загрязнение продуктами эрозии взаимодействующих с плазмой компонентов. Особую опасность представляют прозрачные осаждения, такие как оксиды металлов и углеводородные пленки, которые могут приводить к возникновению интерференционной картины и, как следствие, значительному искажению спектральных характеристик зеркал. Как и в первом случае, устранение ошибки данного типа требует проведения калибровки по излучению объектов с известной температурой. Такую калибровку необходимо проводить регулярно.

Нагрев оптических элементов, расположенных вблизи плазмы, также может давать заметный вклад в ошибку измерения температуры стенки. Охлаждение первых зеркал представляется необходимым требованием к дизайну диагностической системы ИК-термографии.

Учет факторов, обусловленных фоновым свечением плазмы и отраженным излучением, представляет наибольшую трудность, поскольку не может быть выполнен путем калибровки во время паузы в работе токамака. В работе [12] была проведена оценка ошибок измерения, связанных с непрерывным фоном тормозного излучения (ТИ) в объеме, ограниченном телесным углом сбора света. Сравнение спектральной интенсивности ТИ электронов, имеющих максвелловское распределение по скоростям и полезного сигнала для худшего случая электронной температуры $T_e \sim 1$ эВ показало, что уровень фоновой засветки на детекторе сравним с полезным сигналом при температуре стенки 600 К и составляет менее 30% — при 700 К

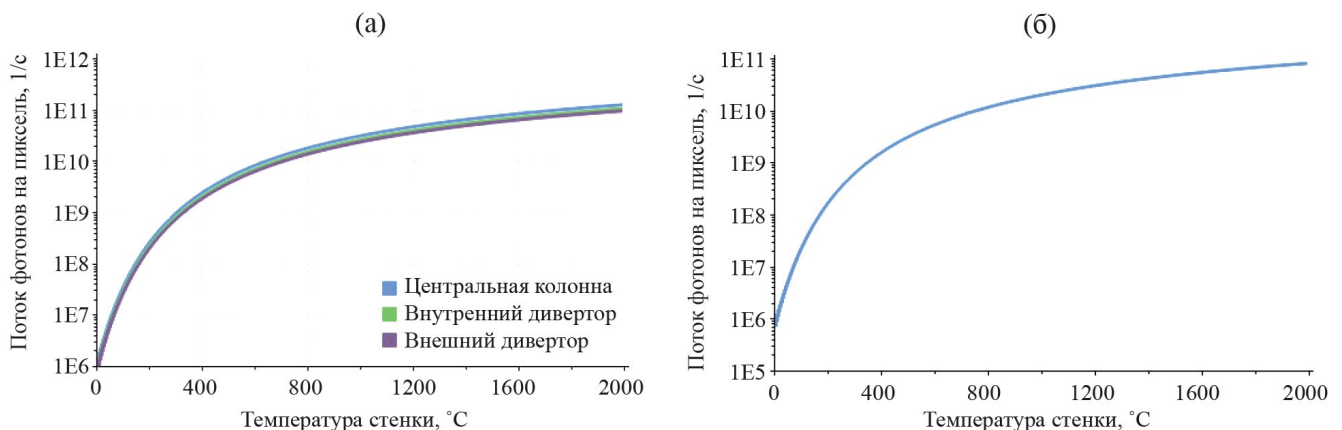


Рис. 6. Поток фотонов в спектральном диапазоне 4—4.1 мкм на пиксель матрицы детектора 1000X1000 в зависимости от температуры стенки. а) расчет для каналов обзора центральной колонны, внутренней и наружной мишеней дивертора; б) расчет для обзорного канала с расстоянием до объекта 3 м.

в спектральном диапазоне 4000—5500 нм. Выводы, сделанные в работе [12] позволяют рассчитывать на измерение температуры стенки ~ 600 К с ошибкой, не превышающей 15%. Измерения в спектральном диапазоне — до 5.5 мкм позволят использовать сапфировые окна для вывода излучения из вакуумного объема ТРТ.

Еще одним фактором, влияющим на точность измерения температуры ОПЭ во время импульсов токамака, является отражение исследуемой поверхностью излучения других, более горячих элементов конструкции. Из-за низкой излучательной способности металлической облицовки и неоднородного излучения окружающих конструкций, соотношение излучаемой и отраженной от поверхности мощности в цельнометаллических токамаках многократно выше, чем в случае графитовой стенки, где отраженный тепловой поток пренебрежимо мал и может быть исключен из рассмотрения. Так, для диагностики VIS/IR верхнего порта ИТЭР [7] было показано, что неучтенный вклад отраженного потока может привести к завышению температуры поверхности до 20% для горячих областей и до 90% для холодных областей.

Наши расчеты подтверждают, сделанный в работе [7] вывод о том, что отраженное излучение может многократно превышать собственное излучение стенки в случае наличия сильно нагретых областей, таких как область пересечения с сепаратрисой.

Для оценки доли отраженного излучения в программном пакете COMSOL Multiphysics была построена теплофизическая модель радиационного теплопереноса на основе упрощенной геометрии

ТРТ. Модель включала в себя решение стационарного уравнения теплопереноса с граничными условиями первого рода в совокупности с расчетом излучения, переизлучения и поглощения света с учетом интегрирования яркости по телесным углам в итеративном процессе схождения. В качестве граничных условий были заданы постоянная температура на внешней стороне камеры, равная 200°C , а также полоса, шириной 1 см с температурой 2000°C на внутренней и внешней мишенях дивертора. Распределение температуры по поверхности первой стенки и дивертора ТРТ показаны на рис. 7. Коэффициент серости вольфрама ϵ в симуляции выступал в качестве параметра.

Полученная в результате моделирования карта поверхностной светимости показана на рис. 8. Как видно из приведенного сечения, основная мощность отраженного излучения приходится на область дивертора. По мере удаления от нагретой области, полная светимость падает вместе с уменьшением доли отраженного излучения немонотонно, образуя отдельные области с повышенной светимостью. Следует отметить, что в модели использовалась упрощенная схема ТРТ, не учитывающая всех деталей геометрии внутреннего объема. С учетом всех конструктивных элементов в объеме картина распределения светимости может усложниться еще больше. В работе [8] приведены результаты измерения температуры стенки токамаков WEST и ASDEX Upgrade в ходе разрядов. Показано, что целый ряд горячих областей и точек на температурной карте, полученной в ходе измерений обусловлены исключительно отраженным излучением.

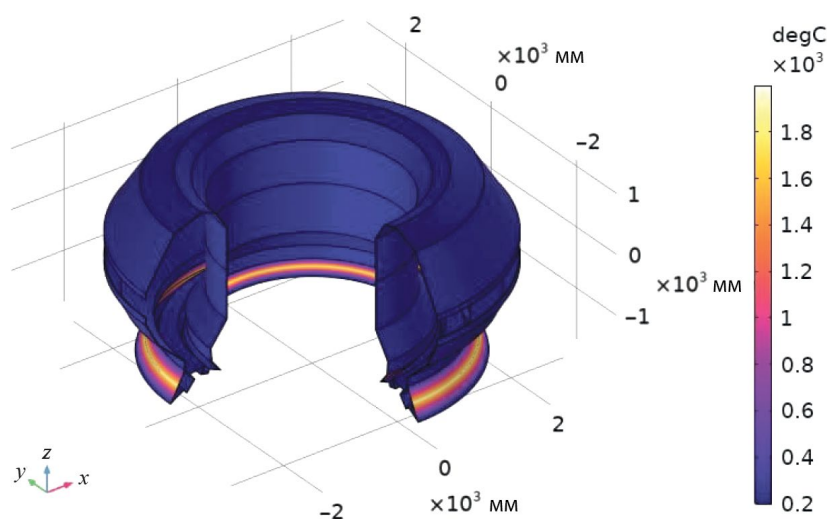


Рис. 7. Стационарное поле температур внутренней поверхности токамака, заданное в модели радиационного теплопереноса

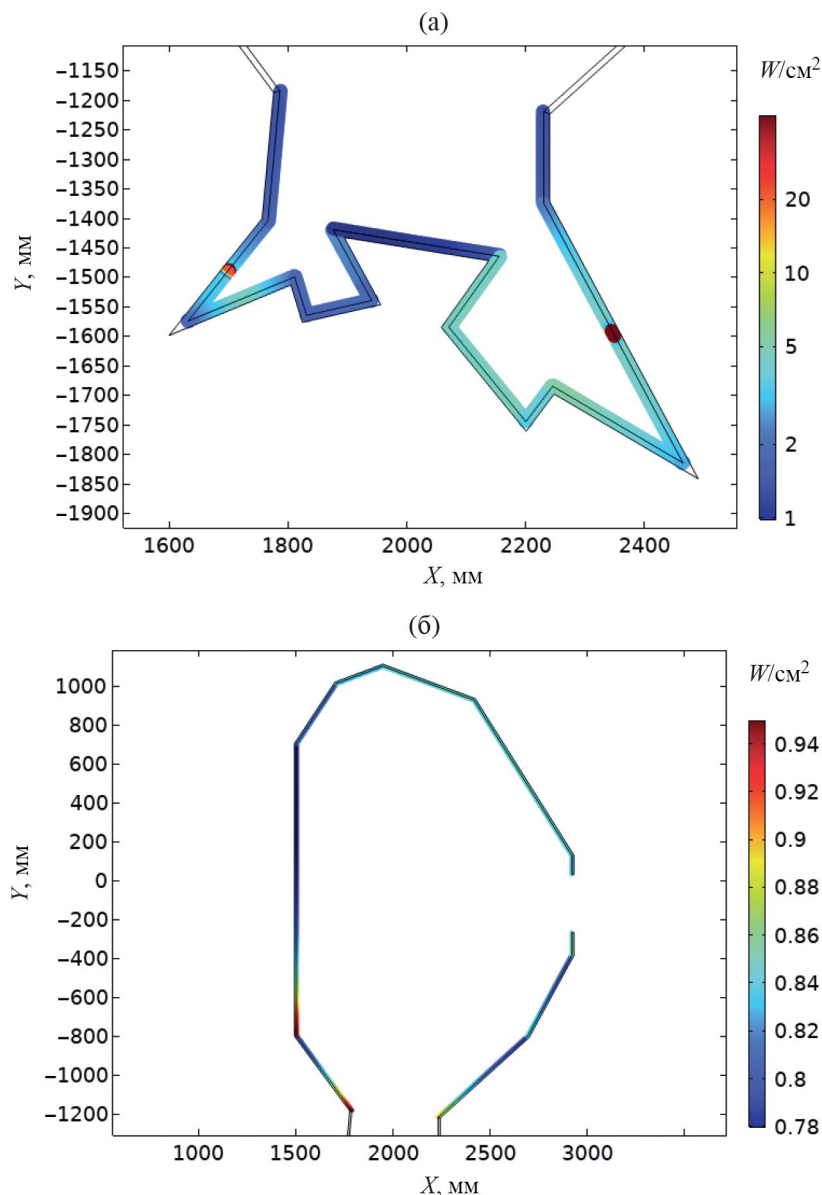


Рис. 8. Поверхностная светимость а) дивертора, б) первой стенки.

На рис. 9 показаны данные расчета плотности теплового потока со стенки в области центральной колонны как функции коэффициента серости вольфрама. На графике приводятся зависимости для теплового излучения стенки и диффузно отраженного излучения для двух случаев: когда вся внутренняя поверхность нагрета равномерно и когда к равномерному излучению стенки добавляется горячая область пересечения с сепаратрисой.

Для полированного вольфрама величина коэффициента серости лежит в диапазоне $\epsilon \sim 0.02\text{--}0.04$. Для вольфрамовых элементов в токамаке значение ϵ может быть на порядок больше. Так, в экспериментах на токамаке WEST [11] было показано, что

в зависимости от области наблюдения, коэффициент серости вольфрамовой облицовки может варьироваться в диапазоне от 0.1 до 0.4.

На основании проведенного моделирования можно сделать вывод, что при уменьшении коэффициента серости от 0.4 до 0.1 отношение диффузной к собственной светимости растет от 4 до 15. Это значит, что в случае измерения полной плотности потока мощности со стенки с температурой 200 °С измеряемая температура будет меняться от 400 °С до 670 °С. Сравнивая интенсивность отраженного излучения в области центральной колонны при однородно нагретой внутренней поверхности (рис. 9 внизу) и при добавлении горячей полосы в диверторе

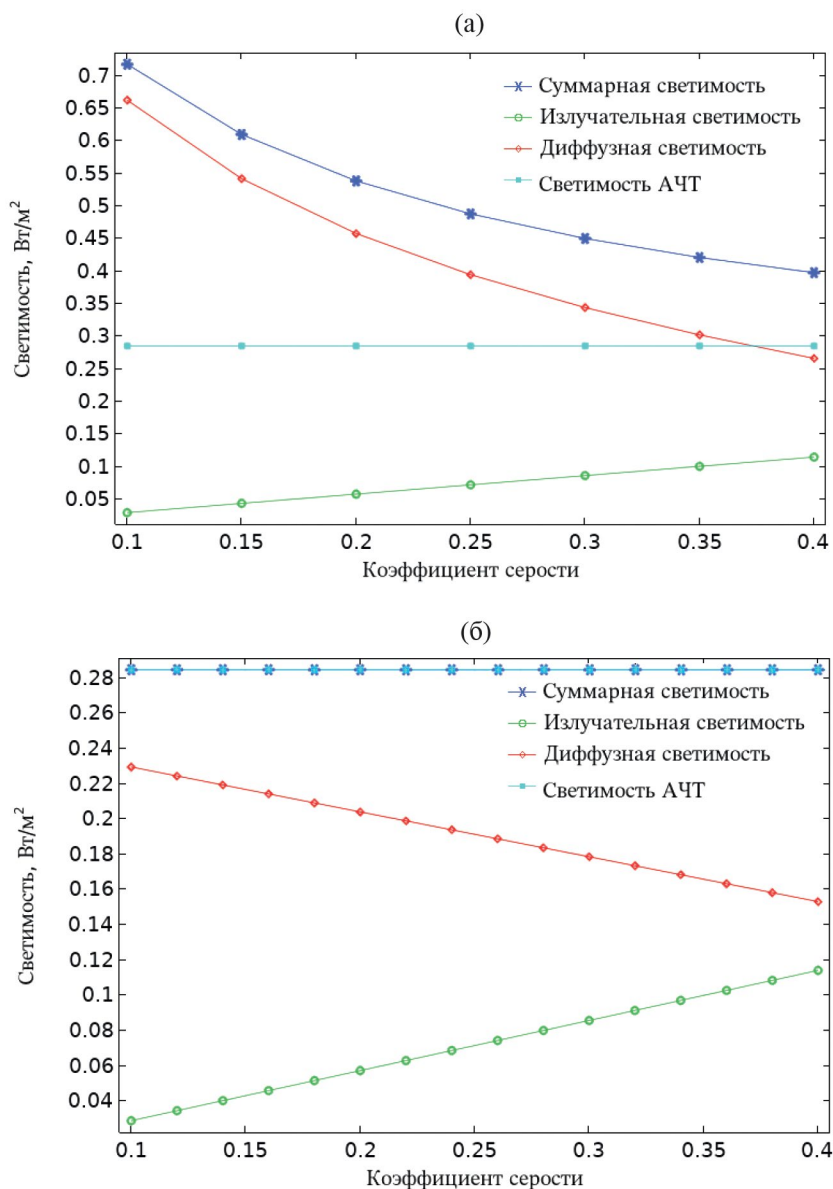


Рис. 9. Плотности теплового потока, излучаемого стенкой, отраженного от стенки, суммы этих потоков и излучения стенки, как абсолютно черного тела (АЧТ) в области центральной колонны в зависимости от коэффициента серости. а) излучает первая стенка и дивертор; б) излучает только первая стенка.

(рис. 9 сверху), можно сделать вывод о сравнимом вкладе свечения дивертора и первой стенки в отраженный тепловой поток. Стоит отметить, что в случае равномерно нагретой поверхности сумма плотностей теплового потока, излучаемого и отраженного стенкой не зависит от коэффициента серости и совпадает с плотностью излучения абсолютно черного тела (АЧТ). Данное наблюдение можно объяснить следующим образом: в тепловом равновесии локальные потоки тепла излучаемые и поглощаемые стенкой равны и пропорциональны коэффициенту серости.

$$I_{\text{absorb}} = I_{\text{emis}} = \varepsilon I_{BB}, \text{ где } I_{BB} \text{ — плотность излучения АЧТ.}$$

С другой стороны, доля поглощенного и отраженного излучения связаны соотношением: $\frac{I_{\text{ref}}}{I_{\text{Absorb}}} = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}$, и, следовательно, сумма излучаемого и отраженного стенкой тепловых потоков не зависит от ε

$$I_{\text{emis}} + I_{\text{ref}} = \varepsilon I_{BB} + (1-\varepsilon) \cdot I_{BB} = I_{BB}$$

Очевидно, ошибка измерения температуры, обусловленная переотражением будет зависеть от схемы регистрации. Например, равномерно нагретая стенка будет давать вклад в ошибку в случае регистрации интегральной светимости и не повлияет

на результаты измерения в случае измерения спектрального отношения сигнала. В последнем случае для расчета ошибки измерения необходимо знать не только интенсивность отраженного излучения, но и ее спектральное распределение.

Очевидно, для получения достоверной информации о температуре первой стенки необходимо учитывать эффекты отражения при постобработке данных диагностики ИК-термография. Одним из способов оценки интенсивности отраженного излучения является установка референсных металлических образцов с приваренной с обратной стороны термопарой. Тогда, зная их истинную температуру и измеряя полную плотность теплового потока с образца, можно сделать вывод о доле отраженной мощности. Для определения плотности потока, отраженного от защитной облицовки необходимо также знать коэффициенты серости референсного образца и облицовки. Однако, как показано в работе [8], интенсивность отраженного излучения неоднородна по поверхности и имеет локальные максимумы, заметно превышающие средний уровень. Следовательно, для построения карты интенсивности отраженного излучения недостаточно калибровки с использованием референсных образцов и необходимо проведение численного моделирования радиационного теплопереноса, учитывающего все детали геометрии внутреннего объема.

5. ВЫВОДЫ

В табл. 2 приведены требования к измерениям температуры первой стенки и дивертора токамака ТРТ [13]. В эту же таблицу сведены результаты расчетов разрешения по пространству и времени для двух рассмотренных выше вариантов реализации диагностики ИК-термография. Как видно из таблицы, широкоугольная система, обеспечивая

полный обзор по полоидальному сечению (рис. 16) не может обеспечить требуемого пространственного разрешения на всей первой стенке. В то же время четырехканальная система с запасом удовлетворяет требованиям по пространственному разрешению, но имеет ограниченную область наблюдения. Очевидно, у обеих систем существует определенный потенциал для оптимизации, на что и должны быть нацелены дальнейшие шаги по разработке диагностики. Однако главной задачей на данный момент представляется отработка алгоритмов калибровки и методик расчета ошибок измерения температуры. В первую очередь это актуально для учета ошибки, обусловленной отражением исследуемой поверхностью излучения обращенных к плазме конструктивных элементов. Как показано выше, неопределенность связанная с переотражением может приводить к завышению измеряемой температуры в несколько раз. Расчет соответствующей ошибки измерения заключается в построении синтетической диагностики, включая построение карты температурных полей на основе расчетных данных о тепловых потоках из плазмы на стенку, расчет радиационного теплопереноса в 3D- геометрии и моделирование взаимодействия излучения с материалом первой стенки. В качестве входных данных для данной синтетической диагностики будут использоваться данные калибровки, включающие построение распределения величины коэффициента серости по поверхности первой стенки и измерения на референсных образцах, установленных на первой стенке с независимым измерением их температуры.

В данной статье не рассматривались вопросы, связанные с защитой оптического тракта от воздействия плазмы, включающего распыление поверхности зеркал быстрыми частицами и напыления продуктов эрозии первой стенки. Оба эти фактора

Таблица 2. Требования к измерениям температуры ОПЭ ТРТ и достижимые параметры для 2-х вариантов реализации диагностики ИК-термография

Классификация измерений	Область обзора	Требования к диапазону измерения и разрешению	Каналы диагностики ИК-термография: диапазон измерения, достижимое разрешение по пространству и времени	
			Обзорный канал + 2 диверторных канала	4-канальная система
Измерения, необходимые для безопасной работы и защиты установки (1.1а)	Дивертор	200—3000 °C 2 мс	Обзорный канал: от 50 °C, 6—10 мм, 0.1 мс для 200 °C	Дивертор, внешняя мишень: от 50 °C, 0.7—2 мм, 0.1 мс для 200 °C
Измерения, необходимые для исследования характеристик диверторной плазмы (1.2а):			Дивертор, внешняя мишень: от 50 °C, 0.7—2 мм, 0.1 мс для 200 °C	Дивертор, внутренняя мишень: от 50 °C, 0.5 мм, 0.1 мс для 200 °C
Измерения, необходимые для базового управление установкой (1.1б)	Первая стенка	200—3000 °C 10 мс, 5 мм	Обзорный канал: от 50 °C, 2.5—10 мм, 0.1 мс для 200 °C	Центральная колонна: от 50 °C, 0.5—1 мм, 0.1 мс для 200 °C

могут приводить к деградации оптических свойств зеркал, и, как следствие, искажению спектральных характеристик оптической системы [14]. В качестве защитных систем диагностики ИК-термографии предполагается использовать механические заслонки на основе пьезокерамических или биметаллических актюаторов. Первые зеркала, расположенные на границе с плазмой и подверженные загрязнению, также планируется оснастить системой плазменной очистки на основе ВЧ-разряда [15].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Разработка оптической схемы диагностики (разд. 2) выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание, тема № FFUG-2024-0034). Расчет разрешения по времени (разд. 3), а также рассмотрение вопросов калибровки (разд. 4) выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-00023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. DOI: 10.1088/1741-4326/ab8c65.
2. Guilhem D. // Fus. Eng. Des. 2005. V. 74(1) P. 879. DOI:10.1016/j.fusengdes.2005.08.021
3. 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. DOI: 10.1088/0029-5515/53/9/093031.
4. Houry M., Pocheau C., Aumeunier M.-H., Balorin 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. DOI: 10.1016/j.fuse-ngdes.2019.02.017.
5. 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. DOI:10.1063/1.4985086.
6. Guilhem D., Reichle R., Roche H. // QIRT Journal. 2006. V.3. № 2. P. 1.
7. Aumeunier M.-H. et al // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. V.40. P.753
8. M.-H. Aumeunier et al. // Nuclear Materials and Energy. 2021. V. 26. 100879
9. Раздобарин А.Г., Шубин Я.Р., Белокур А.А., Богачев Д.Л., Елец Д.И., Медведев О.С., Мухин Е.Е., Снигурев Л.А., Алексеенко И.В. // Физика плазмы. 2024. Т. 50. С.
10. Мазуль И.В., Гиниятуллин Р.Н., Кавин А.А., Литунковский Н.В., Маханьков А.Н., Пискарев П.Ю., Танчук В.Н. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 12. С. 1103.
11. Gaspar J. et al. // Nucl. Mat. and Energy. 2020. V.25.100851
12. А. Г. Раздобарин, Ю. М. Гаспарян, Д. Л. Богачев, А. М. Дмитриев, Д. И. Елец, А. Н. Коваль, Г. С. Курские, Е. Е. Мухин, Д. Г. Булгадарян, С. А. Крат, Е. Д. Маренков, И. В. Алексеенко // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 12. С. 1216.
13. Кащук Ю. А., Коновалов С. В., Красильников А. В. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 12. С. 1159.
14. Litnovsky A. et al. // Journal of Nuclear Materials. 2007. V. 363—365. 1395—1402.
15. Razdobarin A. G. et al. // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. P. 093022.

Options for Implementation of IR Thermography Diagnostics in a Tokamak with Reactor Technologies TRT

A. G. Razdobarin^{a, b, *}, Ya. R. Shubin^a, D. L. Bogachev^b, D. I. Elets^{a, b}, O. S. Medvedev^{a, b}, E. E. Mukhin^a, and L. A. Snigirev^a

^a *Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021 Russia*

^b *Spectral-Tech, St. Petersburg, 194223 Russia*

* *e-mail: Aleksey.Razdobarin@mail.ioffe.ru*

AbstractOptions for implementing the IR thermography diagnostic system in a TRT facility are considered. Two variants of the optical scheme for measuring the temperature of the first wall and divertor targets are proposed: a wide-angle system combined with two divertor channels and a four-channel viewing system. The optical resolution of both systems and the levels of the collected signal are numerically simulated. On the basis of the calculations performed, conclusions are drawn about the compliance of the systems with the requirements for measuring the temperature of TRT plasma-facing elements. The sources of the temperature measurement error are considered, and the error caused by the reflection of radiation from structural plasma-facing elements by the surface under study is estimated. Calibration issues for IR thermography diagnostics are also discussed.

Keywords: tokamak TRT, IR thermography, first wall