УДК 621.039.665

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КАНДИДАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ НА ТОКАМАКЕ КТМ

Б.Ж. Чектыбаев¹, Э.Г. Батырбеков², М.К. Скаков², А.Д. Садыков¹, Е.А. Кашикбаев¹

¹Институт атомной энергии Национального ядерного центра РК, Курчатов, Казахстан

²Национальный ядерный центр РК, Курчатов, Казахстан

В качестве одного из основных инструментов для измерения распределения температуры на поверхности исследуемых материалов на токамаке КТМ планируется использовать инфракрасную (ИК) тепловизионную камеру. Однако при измерении температуры поверхности материалов с малым значением излучательной способности, например, металлов, неточность может достигать десятков процентов. Это связано с изменением значения излучательной способности тела вследствие нагрева тепловыми потоками плазмы, а также вследствие модификации поверхности от воздействия плазмы. В работе представлен оригинальный способ повышения точности измерения тепловизионной камерой температуры поверхности исследуемых материалов на токамаке КТМ, разрабатываемый авторами в настоящее время. Способ основан на использовании инфракрасного углекислотного лазера. В рассматриваемом способе инфракрасный лазер предлагается использовать для отслеживания изменения излучательной способности поверхности исследуемых образцов во время эксперимента (плазменного разряда) и соответствующей коррекции температурных измерений тепловизионной камеры. В работе рассматривается предлагаемый способ измерений и обосновывается возможность его использования. Также приводятся результаты по настройке и тестированию измерительной схемы.

Ключевые слова: ИК-диагностика, тепловизионная камера, токамак КТМ, первая стенка, углекислотный лазер, бесконтактная термометрия, излучательная способность.

ON THE FEASIBILITY OF IMPROVING ACCURACY OF THERMOGRAPHIC MEASUREMENTS OF FIRST WALL CANDIDATE MATERIALS OF THERMONUCLEAR REACTORS FOR RESEARCHES AT KTM TOKAMAK

B.Zh. Chektybayev¹, E.G. Bатыrbekov², M.K. Skakov², A.D. Sadykov¹, Ye.A. Kashikbayev¹

¹Institute of Atomic Energy of National Nuclear Center of RK, Kurchatov, Kazakhstan

²National Nuclear Center of RK, Kurchatov, Kazakhstan

Infrared (IR) thermographic camera is planned to be used on KTM tokamak as a main instrument to measure temperature distribution on the surface of test samples. However, uncertainty in measuring temperatures of material surfaces with small values of emissivity e.g. metals, can reach tens of percent. That is related to changing of material emissivity as a result of the surface heating by plasma flux and its modification under plasma impact. Original technique of increasing accuracy of test samples surface temperature measurements with thermographic camera on KTM tokamak, which is currently being developed by the authors, is presented in the paper. The technique is based on using infrared CO₂ laser. The proposed approach uses CO₂ laser to determine changes of test samples emissivity during experiment (plasma discharge) and make relevant corrections of temperature measurements of thermographic camera. The proposed measurement technique and justification of its feasibility are presented in the paper. Results of adjustment and testing of measurement scheme are shown and discussed in the paper as well.

Key words: IR diagnostic, thermographic camera, KTM tokamak, first wall, CO₂ laser, noncontact thermometry, emissivity.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-4-21-30

ВВЕДЕНИЕ

В Республике Казахстан завершается создание токамака КТМ. Одной из основных целей создания токамака КТМ является исследование поведения кандидатных материалов первой стенки будущих термоядерных реакторов (ТЯР) под действием тепловых потоков плазмы [1]. На строящемся в настоящее время международном экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР планируется применение металлической первой стенки, выполненной из бериллия и вольфрама [2]. Также в мире активно ведутся исследования возможности использования лития в качестве материала первой стенки ТЯР [3] и других материалов.

Следует отметить, что до настоящего времени вопрос выбора материалов первой стенки будущих стационарных энергетических термоядерных реакторов остается открытым [4]. Поэтому исследования, направленные на выбор кандидатных материалов первой стенки ТЯР, удовлетворяющих теплофизическим, механическим и радиационным требованиям, являются очень актуальными. Более того, актуаль-

ной является разработка прецизионных и надёжных способов диагностики состояния поверхности материалов первой стенки ТЯР под действием высокотемпературной плазмы. Одними из важных контролируемых параметров при изучении взаимодействия плазма—стенка являются температура нагрева поверхности обращённых к плазме материалов и величина воздействующих тепловых потоков плазмы. На токамаке КТМ максимальные расчётные тепловые потоки плазмы (до 20 МВт/м²) на дивертор должны соответствовать ожидаемым в ИТЭР.

Наиболее оптимальным способом измерения температуры нагрева исследуемых образцов являются методы бесконтактной оптической термометрии. Методы ИК-термометрии позволяют измерять очень высокие температуры. При использовании тепловизионной камеры можно определить картину распределения температуры на поверхности материала с высоким пространственным и временным разрешением.

Методы ИК-термометрии хорошо применимы при измерении температуры поверхности тел с излучательной способностью, близкой к абсолютно чёрному телу, а также при его заранее известном значении. На токамаках методы бесконтактной ИК-термометрии успешно использовались при измерении температуры графита, установленного в качестве материала первой стенки, поскольку его излучательная способность близка к 1.

Вместе с тем использование металлической первой стенки приводит к проблеме точного измерения температуры её поверхности методами оптической термометрии. Это связано с тем, что металлы имеют малую излучательную способность, которая к тому же имеет зависимость от температуры. Также излучательная способность зависит от состояния поверхности материала и может меняться с течением времени как в связи с модификацией поверхности под действием излучения плазмы, так и в связи с осаждением на поверхности пылевых частиц самого материала, например, частиц бериллия, используемого в качестве материала первой стенки, на диверторные пластины, изготовленные из вольфрама. При этом погрешность измерений может достигать десятков процентов, особенно в области высоких температур.

Для решения проблемы изменения излучательной способности металла во время нагрева поверхности и изменения его состояния для ИТЭР разрабатывается специальный двухцветный пирометр, использующий принцип пирорефлектометрии [5]. Данный метод находится на стадии НИОКР. Одним из недостатков разрабатываемой диагностики является то, что измерение температуры производится только в одной пространственной точке. Однако на поверхности металлической первой стенки и дивертора имеют место сильные градиенты температур вследствие неравномерного воздействия потоков высокотемпературной плазмы. Разработка предлагаемого способа позволит измерять пространственное распределение температуры на поверхности материала, взаимодействующего с плазмой, и поэтому он будет востребован экспериментаторами.

Для наблюдения за распределением температуры на поверхности исследуемых образцов, размещённых на диверторе КТМ, нашей исследовательской группой была разработана диагностика ИК-визуализации (ИКВ) на основе тепловизионной камеры [6]. Данной диагностике также присуща проблема точности измерения температуры металлов.

Для повышения точности измерения температуры металлов диагностикой ИКВ предлагается оригинальный способ, объединяющий принцип пирорефлектометрии и неразрушающего контроля. Способ позволяет отслеживать изменение излучательной способности тела во время нагрева под действием плазменных потоков, а также вследствие её модификации, и проводить соответствующую коррекцию температурных измерений.

ОСНОВНАЯ ИДЕЯ И МЕТОДИКА ПРЕДЛАГАЕМОГО СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ

Основная идея предлагаемого способа заключается в использовании импульсного лазерного излучения, проецируемого на поверхность тела в поле зрения инфракрасной термографической камеры. При импульсном облучении поверхности измеряемого тела происходит частичное отражение лазерного излучения. Поскольку для непрозрачных тел имеется прямая зависимость между излучательной ε и отражательной способностью ρ :

$$\rho + \varepsilon = 1, \quad (1)$$

то при изменении значения одного из слагаемых, например, с ростом температуры, соответственно пропорционально изменяется и второе. Таким образом, контролируя значение отражающей способности тела, можно определить значение излучательной способности.

Коэффициент отражения ρ поверхности тела можно определить как отношение мощности отражённого излучения $W_{отр}$ к мощности падающего излучения $W_{пад}$:

$$\rho = \frac{W_{отр}}{W_{пад}}. \quad (2)$$

Измерение температуры объекта тепловизионной камерой основано прежде всего на детектировании и измерении мощности излучения с поверхности тела $W_{изл}$, которая потом пересчитывается с использованием определённого алгоритма в значение температуры.

В случае воздействия дополнительного излучения на поверхность тела (в нашем случае от лазера) полная мощность $W_{изл}$, детектируемая ИК-камерой, будет складываться из мощности излучения самого тела $W_{тела}$ и мощности отражённого лазерного излучения $W_{отр}$:

$$W_{изл} = W_{отр} + W_{тела}. \quad (3)$$

При зондировании поверхности импульсным инфракрасным лазером со стабильной мощностью излучения легко отследить изменение мощности отражённого лазерного излучения по показаниям ИК-камеры, соответственно измеряя полную мощность излучения тела $W_{изл}$ при воздействии лазера и без него.

На рис. 1 показана оптическая схема измерения. Лазерное излучение $W_{пад}$ проецируется на поверхность исследуемого объекта в поле зрения ИК-камеры. Отражённое от поверхности тела лазерное излучение $W_{отр}$ детектируется камерой.

При использовании специального проекционного объектива узкий лазерный луч расширяется и проецируется на всю поверхность наблюдения ИК-камеры. Таким образом, в перспективе такой подход позволит контролировать изменение степени черноты на всей наблюдаемой тепловизионной камерой поверхности тела.

Для контроля изменения коэффициента отражения предлагается воздействовать периодическими короткими импульсами ИК-лазера длительностью, не превышающей экспозицию одного кадра, с максимальной частотой повторения, равной половине частоты регистрации камеры. При этом импульсы лазера должны быть строго синхронизированы с регистрацией кадров. На рис. 2 показана предлагаемая временная диаграмма работы ИК-камеры и лазера.

Как видно на рис. 2, при использовании такой временной схемы работы камеры и ИК-лазера обеспечивается измерение мощности излучения непосредственно как самого тела $W_{тела}$, так и излучения совместно с отражённым лазерным излучением $W_{изл}$ во времени. При этом максимальная эффективная частота работы камеры снижается в 2 раза.

В зависимости от скорости процесса нагрева поверхности тела частота импульсов лазера может варьироваться от максимальной, равной половине наибольшей частоты кадров ИК-камеры, до минимально необходимой для контроля скорости нагрева.

Для определения изменения коэффициента отражения по данным ИК-камеры измеряется исходная мощность отражённого лазерного излучения $W_{отр}(T_0)$ при температуре T_0 в отсутствие нагрева.

Рис. 1. Принципиальная оптическая схема измерения

Рис. 2. Временная диаграмма работы ИК-камеры и ИК-лазера

Далее, измеряя мощность отражённого лазерного излучения $W_{\text{отр}}(T_i)$, в процессе нагрева при температуре T_i можно определить изменение коэффициента отражения $\Delta\rho$. Изменение коэффициента отражения $\Delta\rho$ по изменению мощности отражённого лазерного излучения теоретически можно определить как

$$\Delta\rho(T_i - T_0) = \frac{W_{\text{отр}}(T_0) - W_{\text{отр}}(T_i)}{W_{\text{отр}}(T_0)} \rho(T_0). \quad (4)$$

Таким образом, измеряя изменение коэффициента отражения, можно определить изменение степени черноты тела. Из уравнения (4) также видно, что для определения абсолютного значения изменения коэффициента отражения $\Delta\rho(T_0 - T_i)$ необходимо исходное значение коэффициента отражения $\rho(T_0)$ в отсутствие нагрева. Поскольку изначально значение $\rho(T_0)$ исследуемого образца не известно, то оно определяется экспериментально перед непосредственным проведением плазменных экспериментов, что не является проблемой.

Поскольку ИК-камера работает в конкретном диапазоне инфракрасного спектра, то для обеспечения проведения измерений по предлагаемому способу необходимо использовать лазер с длиной волны, лежащей в рабочем диапазоне длин волн тепловизионной камеры.

Используемая тепловизионная камера в составе диагностики ИКВ имеет матрицу из микроболометров и работает в длинноволновой области ИК-диапазона 7,5—14 мкм, имеет максимальное временное разрешение, равное 5 мс (200 кадр/с).

Для проведения работы был выбран промышленный CO_2 -лазер модели L3S производства компании Access Laser (США). Основные технические характеристики ИК-лазера L3S:

Длина волны, мкм . . .	10,6
Мощность в непрерывном режиме, Вт . . .	1
Стабилизация мощности, % . . .	± 2
Выходной диаметр луча, мм . . .	2,4
Качество моды M2 . . .	<1,1
Расходимость луча, рад . . .	5,5
Коэффициент заполнения, % . . .	0—100
Частота работы, кГц . . .	До 100
Время нарастания/спада, мкс . . .	200
Охлаждение . . .	Воздушное
Размер (Д×Ш×В), мм . . .	190×102×64

На рис. 3 схематически показано планируемое размещение диагностики ИКВ с ИК-лазером на вакуумной камере токамака КТМ. Как видно на рис. 3, наблюдение ИК-камерой за образцами, размещаемыми на диверторе, будет проводиться с вертикального смотрового тренового патрубка. Через этот же патрубок будет проводиться передача лазерного луча. Таким образом, наблюдение будет проводиться по нормали к поверхности измерения. Такое размещение обеспечивает оптимальное перпендикулярное наблюдение за поверхностью исследуемых материалов, размещаемых на диверторном столе токамака КТМ, а также обеспечивается наибольшая мощность отражённого лазерного луча, попадающего на детектор ИК-камеры.

Для пропускания дальнего ИК-излучения от CO_2 -лазера, а также для обеспечения проведения измерений ИК-камерой используется смотровое окно, изготовленное из селенида цинка (ZnSe).

Рис. 3. Схема термографических измерений на токамаке КТМ

РАСЧЁТНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ

Для оценки возможности использования предлагаемого способа измерений и условий его реализации были решены две задачи:

- оценка мощности лазерного излучения, необходимого для детектирования отражённого сигнала в поле зрения камеры в диапазоне различных температур от металлической поверхности;
- степень нагрева поверхности тела от импульсного лазерного воздействия.

Перед проведением расчётов было сформулировано требование к состоянию поверхности исследуемого материала, в частности, его шероховатости. С точки зрения отражения лазерного излучения возможны два варианта: зеркально направленное и диффузное. Зеркальное отражение не является подходящим вариантом, в первую очередь, в связи с тем, что лазерный луч отражается в одном направлении в зависимости от угла падения исходного луча. В данном случае необходима точная оптическая юстировка лазера и камеры для обеспечения детектирования излучения, что создаёт большие трудности в настройке и неудобство в использовании.

Диффузное отражение имеет преимущество, поскольку в данном случае лазерное излучение рассеивается во все стороны. Для обеспечения диффузного отражения поверхность материала должна иметь шероховатость R_z с величиной не менее длины волны падающего излучения λ .

Расчёт мощности отражённого лазерного излучения. Для оценки мощности отражённого лазерного излучения по сравнению с мощностью излучения тела для разных температур необходимо рассчитать мощность излучения тела в рабочем диапазоне ИК-камеры.

Для расчёта мощности излучения тела в интересующем спектральном диапазоне можно воспользоваться уравнением Планка

$$R = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda, T) = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \quad (5)$$

Таким образом можно оценить мощность излучения тела с единицы площади в любом диапазоне длин волн и степень черноты ε .

Для проведения расчётов диаметр лазерного луча, падающего на поверхность тела, был принят равным 30 мм, поскольку до такого диаметра произойдёт уширение лазерного луча на длине, равной 2 м, что соответствует расстоянию от смотрового окна трекового патрубка до диверторного стола (см. рис 3). При этом считалось, что профиль мощности лазера не имеет пиков, а равномерно распределён по диаметру луча. Для проведения оценочных расчётов такое предположение допустимо, в реальности же лазерный луч имеет неравномерный гауссовый профиль распределения мощности.

Также при проведении расчётов принималось, что падение лазерного луча и наблюдение ИК-камерой осуществляются нормально (перпендикулярно) к поверхности тела.

Как было показано, максимальная мощность лазера составляет 1 Вт. Однако для проведения расчётов была принята мощность 0,5 Вт.

Также для проведения расчётов, для оценки сверху была принята степень черноты тела $\varepsilon = 0,7$, поскольку в данном случае будет происходить наименьшее отражение от поверхности тела. Данная степень черноты ориентировочно будет соответствовать окисленной матовой металлической поверхности.

Исходя из принципа работы тепловизионной камеры, детектирование дополнительного отражённого лазерного излучения на тепловом изображении будет проявляться в резком повышении температуры в показании камеры в месте отражения лазерного луча. Назовём температуру тела, измеренную камерой при детектировании отражённого лазерного излучения, кажущейся температурой. При проведении расчётов для наглядности и анализа результатов расчётов будет удобнее переводить суммарную мощность излучения тела и отражённого лазерного излучения в значении температуры, т.е. по полученной сум-

марной мощности определять температуру тела. В табл. 1 сведены результаты расчётов для разных температур тела до 1000 °С.

Т а б л и ц а 1. Кажущаяся температура тела вследствие измерения ИК-камерой отражённого лазерного излучения мощностью 0,5 Вт при разных температурах и степени черноты тела

Температура тела, °С	Изменение кажущейся температуры ΔT вследствие лазерного излучения на тело, °С			
	$\epsilon = 0,1$	$\epsilon = 0,3$	$\epsilon = 0,5$	$\epsilon = 0,7$
20	757	262	165	79
200	623	20	82	37
300	499	150	68	30
700	422	114	50	23
1000	400	106	45	20

Как видно из табл. 1, при воздействии лазера и небольших значениях излучательной способности тела (в области до $\epsilon = 0,5$) будет иметь место достаточно высокое значение кажущейся температуры. Также можно заметить, что при увеличении степени черноты при одной и той же температуре имеет место заметное снижение кажущейся температуры, достаточное для измерения изменения степени черноты. Изменение кажущейся температуры зависит от коэффициента отражения и мощности зондирующего луча лазера. Как показал расчёт, мощности лазера 0,5 Вт должно быть более чем достаточно для работы, поскольку для большинства реальных металлических поверхностей излучательная способность ϵ будет намного меньше 0,5.

Расчёт температуры нагрева поверхности тела при импульсном воздействии лазера. При воздействии лазерного излучения возможен нагрев поверхности тела при использовании лазера достаточно большой мощностью и длительностью.

Максимальную температуру тела при импульсном нагреве лазерным излучением (на поверхности тела в центре облучённой области в виде круга радиусом r_0 в момент окончания воздействия) для случая постоянной по времени и площади облучённой зоны плотности мощности падающего излучения q_0 можно оценить согласно [7]:

$$T = \frac{2q_0(1-\rho)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_n, \quad (6)$$

где q_0 — плотность мощности падающего лазерного излучения, Вт/м²; ρ — коэффициент отражения поверхности; a — температуропроводность материала; k — теплопроводность материала; τ — длительность импульса; T_n — начальная температура до воздействия лазерного излучения.

Как показал проведённый по уравнению (6) расчёт для вольфрама со степенью черноты $\epsilon = 0,5$, при импульсном воздействии лазера длительностью 5 мс и радиусом падающего луча 15 мм нагрев поверхности будет составлять $9 \cdot 10^{-4}$ °С, что является крайне малой величиной. Таким образом, нагревом поверхности от воздействия лазера можно пренебречь.

Рис. 4. Спектральная излучательная способность вольфрама при разной температуре: 10 — 1200; 11 — 1427; 12 — 1972; 13 — 1366; 14 — 1923; 15 — 2477 К

Спектральная излучательная способность металлов. Следует отметить, что значение излучательной способности тел имеет зависимость от длины волны и, как правило, сильно варьируется в зависимости от рассматриваемого диапазона длин волн. На рис. 4 показаны кривые спектральной излучательной способности вольфрама из [8] для рабочего диапазона длин волн используемой тепловизионной камеры.

Данные на рис. 4 показаны для чистого полированного материала для температур от 1200 К, кроме кривой 9, которая соответствует материалу с исходной поверхностью после изготовления при температуре 523 К. В целом, как

видно на рис. 4, для рабочего диапазона камеры 7,5—14 мкм среднеинтегральное значение излучательной способности приблизительно соответствует значению на длине волны 10,6 мкм. Однако, строго говоря, данное соответствие может не выполняться в реальных условиях эксперимента, поскольку, как было сказано, излучательная способность зависит от многих факторов и для материала с другим физико-химическим составом и состоянием поверхности может сильно отличаться. Это может быть источником дополнительной неточности при определении изменения излучательной способности по предлагаемому способу.

НАСТРОЙКА И ОТРАБОТКА СХЕМЫ И РЕЖИМОВ ИЗМЕРЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

В рамках отработки предлагаемого способа измерений на токамаке КТМ в лабораторных условиях была проведена предварительная настройка схемы и режимов измерения с учётом планируемого размещения измерительного оборудования на токамаке КТМ. Проведены настройка и юстировка оптической схемы измерения, настройка системы синхронизации. Подобраны и настроены режимы работы CO₂-лазера и тепловизионной камеры.

На рис. 5 показано размещение оборудования во время проведения отработки схемы измерения и настройки режимов работы оборудования.

При проведении экспериментов мишень была расположена на расстоянии 2 м от лазера, что соответствует расстоянию между смотровым окном и поверхностью диверторного стола вакуумной камеры КТМ. В качестве мишени использовались различные материалы, такие как графит, металлы с разным состоянием поверхности, т.е. с различным коэффициентом отражения.

Для синхронизации запуска и работы ИК-камеры и CO₂-лазера использовался двухканальный генератор сигналов. С помощью генератора сигналов задавались тактирующие прямоугольные импульсы необходимой длительности и скважности.

Во время экспериментов длительность импульса лазера составляла 3 мс. Частота кадров ИК-камеры 200 кадров/с.

На рис. 6, а показан пример изображения с тепловизионной камеры во время проведения экспериментов. На изображении видна мишень, закреплённая в штативе. На рис. 6, б показано тепловое изображение при воздействии лазерного луча, попадающего на мишень. На тепловом изображении отчётливо видно пятно от лазерного луча, падающего на мишень, выглядящее как зона с увеличенной температу-

Рис. 5. Размещение оборудования при отработке схемы измерения

а

б

Рис. 6. Тепловое изображение мишени с ИК-камеры: а — без воздействия ИК-лазера; б — с воздействием ИК-лазером

рой (кажущаяся температура). Значение кажущейся температуры зависит от мощности лазерного луча, материала мишени и состояния поверхности образца.

Во время проведения настройки и отработки схемы измерения было обнаружено несколько нюансов в работе конкретной модели ИК-камеры и CO₂-лазера.

Особенность работы используемой модели ИК-камеры заключается в наличии инерционности матрицы. Инерционность проявляется в задержке спада сигнала детектируемого лазерного излучения. В целом при работе камеры с максимальной частотой 200 кадр/с и длительностью лазерного излучения 3 мс на изображении с камеры это проявляется следующим образом: имеется первый кадр с непосредственным лазерным излучением на мишени, далее следует последовательность из восьми кадров с постепенным спадом яркости излучения, хотя в эти моменты времени лазерное излучение отсутствует. Затухание сигнала происходит в течение 40 мс. На рис. 7 показана последовательность кадров, иллюстрирующих спад сигнала от детектируемого лазерного излучения вследствие инерционности матрицы камеры.

Рис. 7. Последовательность кадров с ИК-камеры при детектировании отражённого излучения CO₂-лазера (длительность импульса лазера 3 мс): а — 1-й кадр (0—5 мс); б — 3-й кадр (10—15 мс); в — 5-й кадр (20—25 мс); г — 7-й кадр (30—35 мс); д — 9-й кадр (40—50 мс)

В связи с инерционностью камеры, приводящей к соответствующему эффекту спада сигнала, была выбрана временная схема работы, позволяющая реализовать предлагаемую методику измерения. При этом минимальное время между импульсами составляет 50 мс вместо планируемых изначально 10 мс.

Особенность работы CO₂-лазера связана с профилем мощности лазерного луча, точнее, наличием неоднородности профиля мощности лазерного излучения. Неоднородность профиля мощности лазерного излучения приводит к наличию точек с большой плотностью мощности излучения на изображении ИК-камеры, связанного с наличием пика профиля гауссового распределения. В итоге это даёт большую разницу в показаниях по сравнению с другими точками. Физически это проявляется в наличии нескольких точек (пикселей) на тепловом изображении с камеры с очень большим значением температуры, в некоторых случаях, превышающих максимальное значение измеряемого диапазона температуры. Этот эффект особенно проявляется при использовании металлических мишеней с гладкой поверхностью и высоким коэффициентом отражения. На рис. 7, б показано изображение с ИК-камеры с детектируемым лазерным излучением и наличием точек с сильно отличающейся температурой (свыше 160 °С) — пиком плотности лазерного излучения.

Предварительные эксперименты по отработке способа измерения. В первых тестовых экспериментах было измерено отражение лазерного излучения от металлических поверхностей, имеющих разные коэффициенты отражения. В данном эксперименте использовались следующие металлы: вольфрам листовой, стальной лист, вольфрам DF. Все поверхности выбранных материалов были не полированными. Предварительно были проведены измерения их излучательной способности. Измерения проводились путём небольшого нагрева образцов материалов до температуры не более 100 °С с контролем температуры термопарой, установленной на поверхность образца. По измерению тепловизионной камеры подбиралось такое значение излучательной способности, при котором измеренная камерой температура совпадала с показаниями термопары. В табл. 2 приведены значения излучательной способности, полученные по такой методике.

Т а б л и ц а 2. Излучательная способность ϵ образцов материалов

Материал	ϵ	ρ	$\Delta\rho/\rho_1$, %
Пластина вольфрамовая	0,08	0,92	—
Стальная пластина	0,477	0,523	43
Вольфрам DF	0,7	0,3	67

Далее были проведены измерения мощности лазерного излучения, отражённого от поверхности выбранных материалов. На рис. 8 для примера показаны изображения с тепловизионной камеры двух образцов вольфрама во время зондирования их поверхности лазерным излучением.

Мощность лазера была стабилизирована и постоянна в течение всего времени эксперимента для всех измерений. На рис. 8 также видно, что с уменьшением степени черноты наблюдается увеличение диаметра отражённого излучения, что также находится в согласии с теорией. Поскольку лазерный луч имеет гауссовый профиль распределения мощности, то с увеличением отражательной способности поверхности тела отражается больше мощности, в том числе на краю пучка лазера, и её становится достаточно для детектирования ИК-камерой, и это проявляется в эффекте увеличения пятна отражённого лазерного излучения.

В табл. 3 приведены результаты измерения отражённого лазерного излучения для рассматриваемых материалов.

Т а б л и ц а 3. Мощность отражённого лазерного излучения

Материал	$\langle W_{\text{отр}} \rangle$, Вт/(см ² ·ср)	$\Delta W/W_1$, %
Пластина вольфрамовая	0,00777	—
Сталь матовая	0,00388	50
Вольфрам DF	0,00157	79

Как видно из сравнения данных табл. 2 и 3, мощность отражённого излучения увеличивается с увеличением коэффициента отражения с соответствующим уменьшением значения излучательной способности, что находится в чётком согласии с теорией. В табл. 2 и 3 для сравнения также приведены значения относительного изменения коэффициента отражения и мощности отражённого излучения образцов по отношению к вольфрамовой пластине. В идеале значения согласно уравнению (4) должны совпасть. Однако, как следует из табл. 2 и 3, относительное изменение мощности отражённого излучения и коэффициента отражения не совпадает. В среднем отличие составляет 10%. По всей видимости, это связано с отличием среднего коэффициента отражения в диапазоне 7—14 мкм и коэффициента отражения на длине волны лазера для данных материалов. Теоретически при сужении рабочего диапазона камеры и приближении его к длине волны лазера расхождение должно уменьшиться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных расчётов по обоснованию использования предлагаемого способа было установлено, что при импульсном воздействии луча СО₂-лазера длительностью несколько миллисекунд на изображении ИК-камеры будет регистрироваться пятно от отражённого лазерного луча с кажущейся температурой, превышающей температуру поверхности измеряемого материала. При этом, как показали расчёты, способ позволяет измерять изменение степени черноты рассматриваемых материалов до температуры более 1000 °С в зависимости от мощности лазерного излучения и степени черноты поверхности материала.

Также было установлено, что при импульсном воздействии лазера длительностью 5 мс и мощностью 0,5 Вт на рассматриваемые поверхности материалов температура нагрева поверхности не превышает $1 \cdot 10^{-3}$ °С, что является пренебрежимо малым значением.

Проверка предлагаемого способа измерения на материалах с разной излучательной способностью также подтвердила его работоспособность.

На основе проведённой работы можно сделать следующие выводы:

- оценочные расчёты, проведённые по обоснованию возможности использования предлагаемого способа, показали возможность его реализации;
- экспериментальная лабораторная настройка и отработка схемы и режимов измерения подтвердили правильность основных идей предложенного способа.

Рис. 8. Тепловое изображение отражённого излучения СО₂-лазера от различных материалов: а — пластина вольфрамовая; б — вольфрам DF

В рамках дальнейшей работы планируется проведение экспериментов на стенде с высокотемпературным нагревателем, а также на стенде с плазменно-пучковой установкой.

Работа выполнена в рамках гранта Министерства образования и науки РК № AP05133148 «Разработка способа термографических измерений поверхности кандидатных материалов первой стенки ТЯР и его внедрение на материаловедческом токамаке KTM».

REFERENCES

1. **Tazhibayeva I.L. et al.** KTM Experimental Complex Project Status. — *Fusion Science and Technology*, 2005, vol. 47, pp. 746—750.
2. **Fouquet S., Schlosser J., Merola M., Durocher A., Escourbiac F. et al.** Acceptance criteria for the ITER divertor vertical target. — *Fusion Eng. Des.*, 2006, vol. 81 (1—7), pp. 265—268.
3. **Tazhibayeva I., Lublinski I., Vertkov A., Lazarev V., Azizov A., Mazzitelli G., Agostini P.** Mock-up divertor of KTM tokamak on the base of lithium CPS. — *Fusion Science and Technology an International Journal of the ANS*, № 2, 2011, vol. 60, pp. 554—557.
4. **Linsmeier Ch. et al.** Advanced materials characterization and modeling using synchrotron, neutron, TEM, and novel micro-mechanical techniques. A European effort to accelerate fusion materials development. — *J. Nucl. Mater.*, 2013; doi:10.1016/j.jnucmat.2013.04.042.
5. **Lotta F., Netchaieff A. et al.** Advances in optical thermometry for the ITER divertor. — *Fusion Eng. Des.*, 2010, vol. 85, pp. 146—152.
6. **Chektybaev B.Zh., Skakov M.K., Batyrbekov E.G., Stepanova O.A., Ermolenko M.V.** Diagnostics of KTM tokamak IR-visualization for study of plasma action on the first wall candidate materials. — *Vestnik Shakarim GU (Herald of Shakarim SU)*, 2018, № 3, pp. 128—134 (in Russian).
7. **Veiko V.P., Shakhno E.A.** Collection of problems on laser technologies. 3-d edition, revised and enlarged. — StPb: StPb SU ITMO, 2007. 67 p. (in Russian).
8. **Latyev L.N., Petrov V.A., Chekhovskiy V.Ya., Shestakov E.N.** Radiative properties of solid materials. Ed. by A.E.Sheindlin. — M.: Energiya (Energy), 1974. 471 p. (in Russian).

AUTHORS

Chektybaev B.Zh. Institute of Atomic Energy NNC RK, Krasnoarmeyskaya ul.10, 071100 Kurchatov, Kazakhstan; chektybaev@nnc.kz

Batyrbekov E.G. National Nuclear Center of Republic Kazakhstan, Krasnoarmeyskaya ul. 2, 071100 Kurchatov, Kazakhstan; batyrbekov@nnc.k

Skakov M.K. National Nuclear Center of Republic Kazakhstan, Krasnoarmeyskaya ul. 2, 071100 Kurchatov, Kazakhstan; skakovmk@mail.ru

Sadykov A.D. Institute of Atomic Energy NNC RK, Krasnoarmeyskaya ul.10, 071100 Kurchatov, Kazakhstan; sadykov_A@nnc.kz

Kashikbayev Ye.A. Institute of Atomic Energy NNC RK, Krasnoarmeyskaya ul.10, 071100 Kurchatov, Kazakhstan; kashikbaev@nnc.kz

Received 29 August 2019

Revised 27 September 2019

Accepted 30 September 2019

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 4, pp. 21—30