

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра **ФИЗИКА ПЛАЗМЫ**

Магистерская программа **ФИЗИКА ПЛАЗМЫ**

Направление подготовки **03.04.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **МАГИСТРАТУРА**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

Рыжкова Георгия Андреевича

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы Особенности пирометрии поверхности высокотемпературных материалов при различных условиях её импульсного нагрева

**«К защите допущена»**

И.О. заведующего кафедрой

к.ф.-м.н.

с.н.с., ИЯФ СО РАН

Сковородин Д.И./.....  
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

**Научный руководитель**

д.ф.-м.н., доцент

г.н.с., ИЯФ СО РАН

Вячеславов Л.Н./.....  
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 2022

## Оглавление

1.	Введение.....	3
2.	Система диагностики на стенде.....	7
3.	Принцип работы системы диагностики.....	10
3.1	Пирометрия.....	10
3.2	Калибровка фотодетекторов.....	11
3.3	Определение температуры других материалов.....	13
4.	Спектральная излучательная способность материалов.....	15
4.1	Вольфрам.....	15
4.2	Карбид Бора.....	19
5.	Моделирование уровня сигнала фотодетекторов.....	21
5.2	Вольфрам.....	21
5.3	Карбид Бора.....	22
6.	Результаты экспериментов.....	24
7.	Сравнение с теорией.....	28
8.	Заключение.....	33
9.	Список литературы.....	36

## 1. Введение

Одной из основных проблем на пути к созданию термоядерного реактора является выбор материалов для стенки, обращённой к плазме. На текущий момент ведётся создание ИТЭР – масштабного научного проекта по демонстрации технической возможности получения энергии термоядерного синтеза в промышленных масштабах. Для ИТЭР выбрана конфигурация реактора в виде токамака. В таких типах конструкций наиболее интенсивно термоядерная

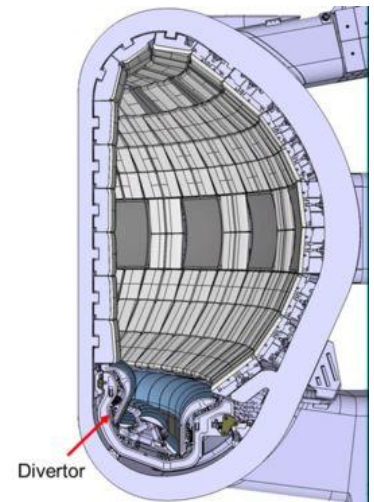


Рис. 1. Дивертор в токамаке ИТЭР

плазма будет воздействовать на стенку в диверторе, что является ключевой проблемой в ходе реализации проекта.

Дивертор – это специальное устройство, служащее для приёма потока частиц с периферии плазменного шнура, которые появляются в силу взаимодействия плазмы со стенкой. Конфигурация магнитного поля токамака такова, что его силовые линии скрещиваются над местом расположения дивертора и выходят наружу через его стенки. Благодаря этому частицы с периферии направляются на стенки дивертора для их нейтрализации и сбора.

В процессе работы термоядерного реактора дивертор будет подвергаться различными видами тепловых нагрузок. На поздних этапах работы ИТЭР планируется использование дейтериевой-тритиевой смеси в качестве термоядерного топлива, поэтому в ходе термоядерной реакции непрерывно будут генерироваться нейтроны, которые затем будут непрерывно нагревать элементы конструкции токамака и активировать металлы, из которых они созданы. Помимо этого, в ходе удержания плазмы на её периферию будут дрейфовать частицы, которые затем будут удаляться с помощью магнитного поля в дивертор под малыми углами. Все эти перечисленные процессы будут генерировать стационарный поток тепла с плотностью мощности до  $10 \text{ МВт/м}^2$  [1]. Кроме этого, дивертор будет

подвергаться ещё и импульсным тепловым нагрузкам. Планируется, что плазма будет удерживаться в режиме H-mode, что приведёт к развитию неустойчивостей на краю зоны удержания, называемых ELM (Edge Localized Mode) [2], которые будут порождать периодические выбросы плазмы на дивертор и создавать нагрузки с плотностью мощности до  $10 \text{ ГВт/м}^2$ , с длительностью импульса порядка 1 мс и частотой порядка 10-30 Гц. Такие быстрые переходные процессы (fast transient) будут наиболее сильно разрушать покрытие дивертора [3].

В 2013 году было принято решение об использовании вольфрама в качестве материала покрытия дивертора с самого начала работы ИТЭР из-за его свойств: вольфрам – тугоплавкий металл с температурой плавления порядка 3700 К, слабо активирующийся нейтронами и плохо поглощающий водород. Однако существуют и проблемы при его использовании. Вольфрам при температурах ниже 700 К является хрупким материалом, и в случае воздействия на него тепловыми нагрузками, какими они предполагаются в токамаке ИТЭР, он начинает растрескиваться, плавиться, разбрызгиваться и испаряться. В результате расплывшиеся микрочастицы вольфрама могут попасть в зону удержания плазмы. Атом вольфрама имеет большое зарядовое число ( $Z = 74$ ), это значит, что большое количество энергии будет затрачиваться на его ионизацию и на тормозное излучение его иона. Всё это приведёт к охлаждению плазмы и нарушению её удержания. Также вольфрамовые частицы могут накапливаться в камере токамака в виде пыли, и за счёт большой площади поверхности она всё же способна поглотить значительное количество трития – радиоактивного изотопа водорода, и в случае разгерметизации камеры эта пыль будет представлять дополнительную радиоактивную опасность. Из-за того, что использование вольфрама в качестве покрытия дивертора имеет ряд недостатков, на данный момент ведутся исследования по применению других материалов с низким зарядовым числом, например, высокотемпературная керамика, которая может быть использована в будущих проектах типа ИТЭР [4].

Экспериментальное моделирование воздействия импульсных тепловых нагрузок (термоударов) на материалы дивертора необходимо для детального исследования процессов эрозии, которые предполагаются в ИТЭР, при этом скорость эрозии материала и физика этого процесса будут определяться максимальной температурой, достигнутой во время переходного процесса. Поэтому важно определять температуру поверхности с высокой точностью непосредственно во время процесса нагрева (*in situ*) как с высоким пространственным, так и с высоким временным разрешениями. Единственным таким возможным методом определения температуры в подобных экспериментах является радиационная пирометрия, так как она не требует контакта с изучаемой поверхностью и благодаря этому позволяет измерять крайне высокие температуры, и её проще реализовать в условиях ограниченного доступа к месту воздействия на материал.

На установке БЕТА в ИЯФ СО РАН (Рис. 2) проводятся эксперименты по моделированию термоударов и их влияние на материалы с помощью электронного пучка [5]. Электронный пучок является удобным инструментом для моделирования, поскольку в отличие от потоков плазмы и лазерного излучения он не создаёт световых помех для оптических методов исследования процессов повреждения поверхности во время процесса нагрева. Однако, существуют ограничения на использование электронного пучка.

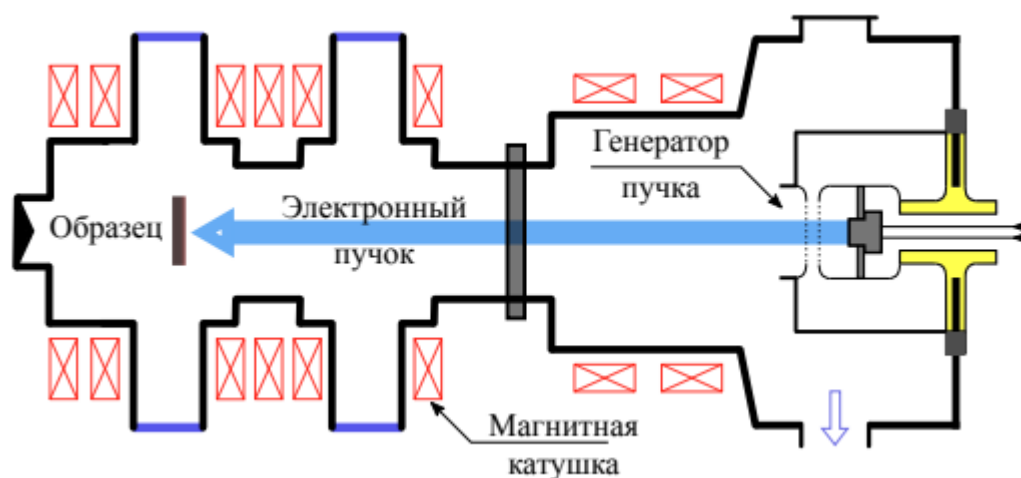


Рис. 2. Установка БЕТА

Например, в случае экспериментов по плавлению поверхности образцов в сильном магнитном поле возможно использование только лазерного излучения, так как оно позволяет проводить эксперименты независимо от направления и силы магнитного поля, что также позволяет моделировать движение расплава дивертора в магнитном поле, а также работать с керамическими и другими неметаллическими образцами. Поэтому для исследования влияния термоударов на керамические образцы в ИЯФ СО РАН был создан отдельный экспериментальный стенд, как дополнение к установке БЕТА, где термоудар моделируется с помощью лазерного импульса миллисекундной длительности.

В работе рассматриваются особенности работы пирометров в экспериментах на стенде с использованием лазерного импульса в качестве инструмента моделирования тепловых нагрузок. Была измерена температура поверхности для образцов из разных тугоплавких материалов непосредственно во время процесса нагрева с помощью инфракрасных камеры и фотодиода. Также теоретически была оценена точность определения температуры поверхности методом пирометрии с учётом различных факторов.

## 2. Система диагностики на стенде

На рис. 3 изображена схема системы диагностики, на которой исследовалось тепловое излучение нагретого образца и измерялась температура по принципу пирометрии. В экспериментах используется импульсный лазер на неодимовом стекле ГОС-1001 с длиной волны 1060 нм, с энергией в импульсе до 100 Дж и длиной импульса до 1 мс. В качестве исследуемых образцов использовались вольфрам и керамический образец из карбида бора (далее  $B_4C$ ).  $B_4C$  известен как материал, имеющий высокую прочность и твёрдость, высокую температуру плавления порядка 2200 К, и как хорошо поглощающий нейтроны. Благодаря этим свойствам, этот материал широко распространён, и его можно использовать в экспериментах с импульсным нагревом для настройки системы диагностики для последующих экспериментов с керамическими образцами. Сами образцы помещались в вакуумную камеру, чтобы избежать возможных химических реакций материалов с воздухом при высоких температурах. Помимо этого, для наблюдения за поверхностью образцов во время экспериментов используется мощный непрерывный диагностический лазер мощностью 5 Вт с длиной волны 532 нм. Так как излучение от лазеров рассеивается на поверхности вольфрама, то в дальнейшем оно может попасть в каналы пирометров, и

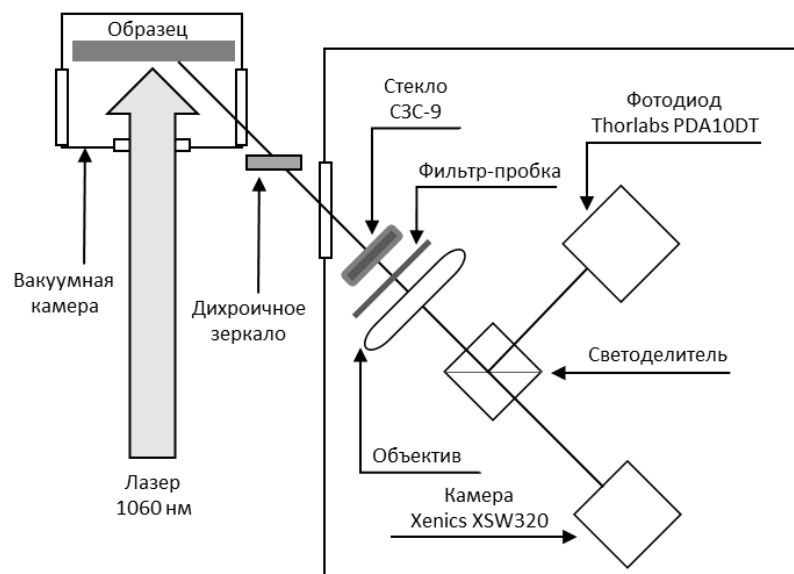


Рис. 3. Оптическая схема диагностики на стенде

необходимо его подавление. Учитывая все эти особенности, оптимальным считается использование для пирометрии фотодетекторов, работающих в коротковолновом инфракрасном диапазоне (0,9 – 2,6 мкм), что позволяет понизить минимальную измеримую температуру поверхности образцов.

В качестве фотодетекторов использовались InGaAs камера Xenics XSW-320 с разрешением 320 на 256 точек, InGaAs фотодиод Thorlabs PDA10DT с возможностью измерения временной динамики температуры до 2 мкс, которые работают в ближней инфракрасной области, что позволяет измерять температуры от 800 до 2000 К. Для возможности одновременного исследования теплового излучения различными системами диагностик, в качестве разделителя потока излучения использовались светоделительный кубик Thorlabs BS033 и дихроичное зеркало Thorlabs DMLP1150B, которое работало на пропускание в случае пирометрической диагностики. Кубики использовались, так как они не вызывают астигматизм в световых пучках. Дихроичное зеркало пропускает в инфракрасном диапазоне, но отражает свет в видимом диапазоне, что использовалось для создания дополнительной системы диагностики, которая работает с зелёным лазером в качестве инструмента наблюдения за состоянием поверхности непосредственно во время нагрева. В качестве фильтров использовались фильтр-пробка Thorlabs NF1064 и цветное стекло СЗС9 – они подавляли импульс нагревающего лазера и излучение непрерывного лазера и не допускали их попадание в фотодетекторы. Чувствительности камеры и фотодиода указаны на рис. 4. На рис. 5 показаны свойства фильтра-пробки – его коэффициент пропускания и оптическая плотность, а также длина волны нагревающего лазера, а на рис. 6 показаны используемые в экспериментах коэффициенты пропускания дихроичного зеркала, светоделительного куба и цветного стекла.



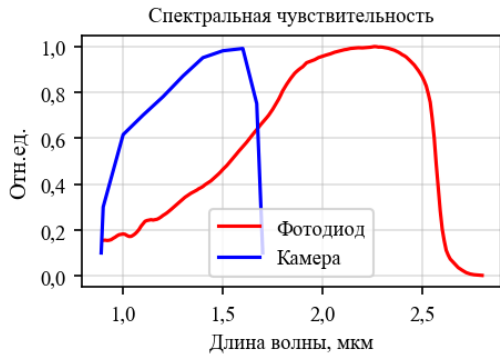


Рис. 4. Чувствительности фотодиода и камеры

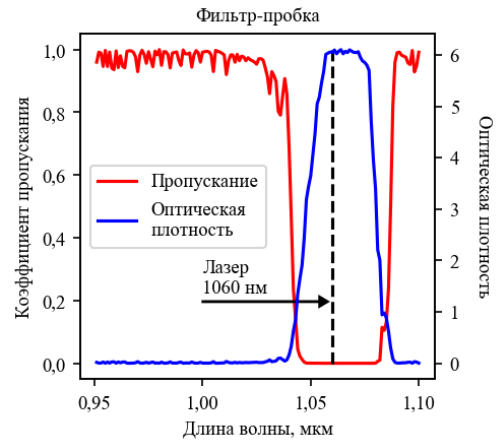


Рис. 5. Оптические свойства фильтра-пробки

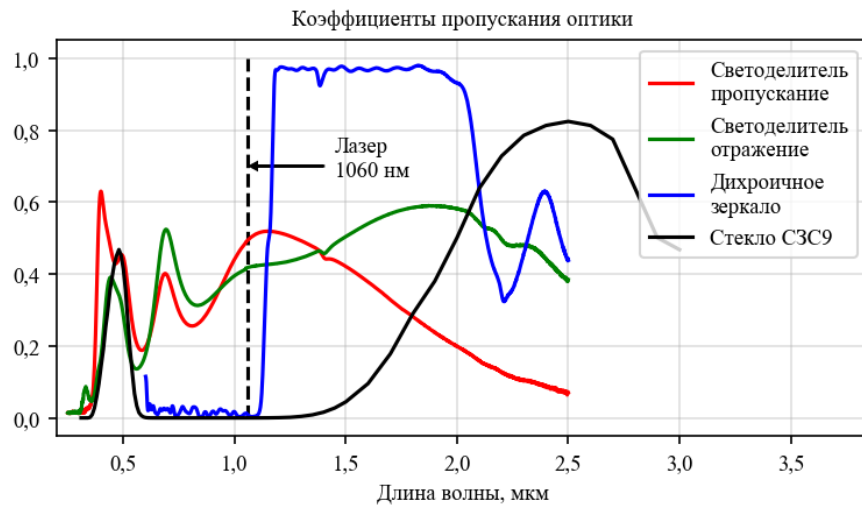


Рис. 6. Коэффициенты пропускания оптики, используемой на стенде — светоделиТЕЛЬный куб (отражение, пропускание), дихроичное зеркало (пропускание) и стекло СЗС9

### 3. Принцип работы системы диагностики

#### 3.1 Пирометрия

Пирометрия – это бесконтактный метод определения температуры, основанный на измерении теплового излучения нагретых тел [6]. Идеальная модель тела, которая поглощает всё падающее на него электромагнитное излучение, называется чёрным телом, и его спектр излучения описывается формулой Планка:

$$R_0(\lambda, T) = \frac{hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (1)$$

где  $R_0$  - спектральная плотность мощности излучения чёрного тела,  $h$  - постоянная Планка,  $c$  – скорость света,  $k$  – постоянная Больцмана,  $\lambda$  – длина волны излучения и  $T$  – температура тела. Экспериментально установлено, что этот закон можно применить и к реальным телам. Для этого введено понятие спектральной излучательной способности  $\varepsilon(\lambda, T)$  как:

$$R(\lambda, T) = R_0(\lambda, T)\varepsilon(\lambda, T) \quad (2)$$

где  $R$  – это спектральная плотность мощности излучения реального тела. Соответственно, пирометрия основывается на измерении абсолютной мощности излучения светочувствительным детектором. Любой такой детектор обладает спектральной чувствительностью  $r(\lambda)$  – отношением изменения сигнала на выходе приёмника к потоку или энергии монохроматического излучения, вызвавшего это изменение. Зная излучательную способность  $\varepsilon(\lambda, T)$  материала и спектральные характеристики фотодетекторов и оптики, используемых в эксперименте, можно определить зависимость сигнала от температуры, который измеряет детектор:

$$I(T) = \int_{\Delta t} dt \int_S dS \int_{\Omega} d\Omega \int_{\Delta \lambda} d\lambda \cdot r(\lambda)\tau(\lambda)R_0(\lambda, T)\varepsilon(\lambda, T) \quad (3)$$

где  $\tau(\lambda)$  – функция спектрального пропускания оптики, используемой в эксперименте,  $R_0$  – спектр черного тела, определяемый формулой Планка,

$\varepsilon(\lambda, T)$  – спектральная излучательная способность,  $\Delta\lambda$  – область чувствительности детектора и пропускания оптики,  $\Delta t$  – время экспозиции детектора. Сравнивая сигнал, измеренный детектором с теоретическим, вычисленным по формуле (3), можно определить температуру объекта. И тогда суть пирометрии заключается в вычислении обратной функции сигнала  $I^{-1}(T)$ .

### 3.2 Калибровка фотодетекторов

Функцию  $I(T)$ , введённую в предыдущем разделе, можно определять различными методами. Один из методов – это калибровка фотодетекторов, которая позволяет определить закон преобразования интенсивности освещения фотодетектора в  $I(T)$ . Для калибровки используется источник теплового излучения, для которого известна зависимость температуры излучателя от подводимой к нему мощности. Так в случае измерения температуры поверхности вольфрамовых образцов таким источником является лампа накаливания. В калибровке (рис. 7) использовалась вольфрамовая ленточная лампа накаливания СИ-10-300, для которой известна зависимость температуры ленты от подводимого к лампе тока. Калибровка производилась на том же экспериментальном стенде, только на место вакуумной камеры с образцом помещалась сама лампа. Соответственно, по известной зависимости температуры ленты можно в дальнейшем сопоставить каждому значению температуры уровень сигнала детектора. Преимущества такой калибровки в том, что не требуется знание излучательной способности вольфрама и спектральных характеристик фотодетекторов и оптики, однако она ограничена температурой примерно 2400 К, которая связана с ограничением тока, подводимого к лампе.

Во время экспериментов по калибровке детекторов определялась зависимость уровня сигнала камеры от тока на лампе, а чтобы не допустить чрезмерного освещения изменялись коэффициенты усиления напряжения на

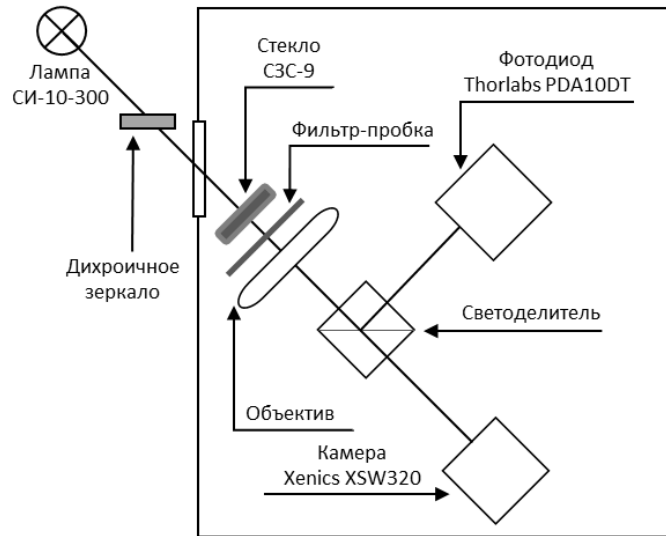
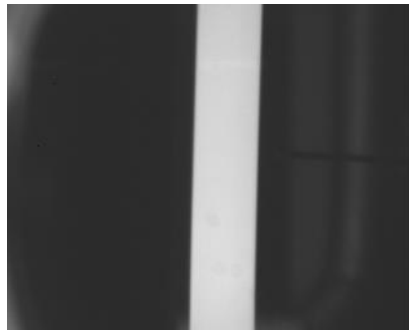


Рис. 7. Оптическая схема калибровки

фотодиоде или время экспозиции камеры. Данные обрабатывались в программе, и по измеренной зависимости сигнала детектора от тока на лампе и известной зависимости температуры ленты лампы от питающего её тока строилась зависимость сигнала детектора от температуры ленты. Пример калибровки камеры показан на рис. 8. Камерой определялась зависимость яркости изображения ленты лампы от тока, подводимого к лампе. Из яркости изображения предварительно была вычтена яркость фона. Из полученной серии снимков ленты (пример приведен на рис. 8а) определялась зависимость яркости её изображения от тока на лампе, как показано на верхнем графике на рис. 8б. Как уже было сказано ранее, для лампы известна зависимость температуры ленты накала от подводимого к ней тока, она показана на среднем графике на рис. 8б. На основе этих двух зависимостей компьютерная программа сопоставляла значения яркости ленты и её температуры и строила эту зависимость, которая приведена на нижнем графике на рис. 8б. Аналогичная калибровка была проведена и для фотодиода, только в отличие от камеры, в калибровке к температуре ленты сопоставлялись значения напряжения на фотодиоде. Калибровка была проведена при различных временах экспозиции для камеры, и при различных коэффициентах усиления для фотодиода, чтобы дополнительно удостовериться в их линейности.



$i = 12 \text{ A}$   
 $T = 1400 \text{ K}$   
 $L = 3250 \text{ ед. яркости}$



$i = 19 \text{ A}$   
 $T = 1950 \text{ K}$   
 $L = 44000 \text{ ед. яркости}$

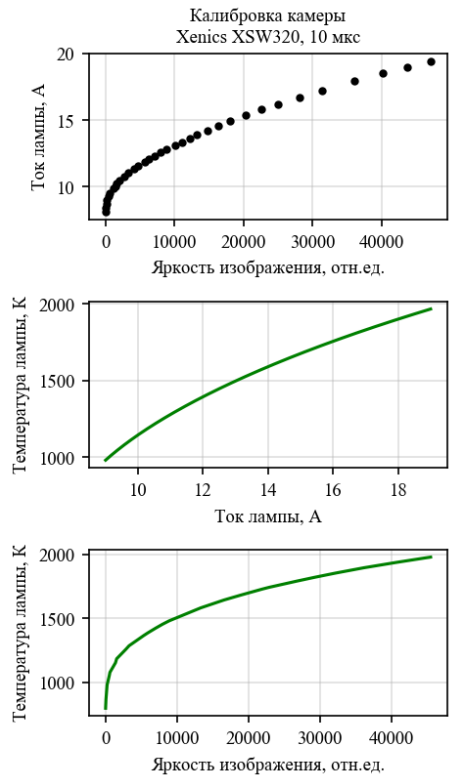


Рис. 8а. Пример калибровочных снимков ленты лампы. Параметры тока, температуры ленты, а также яркость указаны справа от снимков. Время экспозиции 10 мкс.

Рис. 8б. Итоговые результаты калибровки камеры

Рис. 8. Примеры калибровки камеры

### 3.3 Определение температуры других материалов

Функцию  $I(T)$  можно определить с помощью калибровки только в случае измерения температуры вольфрама. Для других материалов  $I(T)$  определяется только теоретическим расчётом. Формулу определения уровня сигнала детектора  $I(T)$  (3) можно переписать как:

$$\begin{aligned}
 I(T) &= \int_{\Delta t} dt \int_S dS \int_{\Omega} d\Omega \int_{\Delta\lambda} d\lambda \cdot r(\lambda)\tau(\lambda)R_0(\lambda, T)\varepsilon(\lambda, T) \\
 &= A \int_{\Delta\lambda} d\lambda \cdot r(\lambda)\tau(\lambda) R_0(\lambda, T)\varepsilon(\lambda, T)
 \end{aligned} \tag{4}$$

Где  $A$  содержит коэффициент перевода в единицы измерения сигнала детектора (яркость для камеры, напряжение для фотодиода), интегралы по площади и телесному углу, которые зависят от геометрии эксперимента, и

различные коэффициенты усиления для детектора. Недостаток теоретического определения  $I(T)$  связан с тем, что необходимо знать спектральные характеристики фотодетекторов и оптики, излучательную способность материала в широких диапазонах длин волн и температур, а также достаточно точно измерить геометрию стенда. В таком случае область определения температуры будет ограничена областью определения излучательной способности и особенностями пирометра. Но точность определения температуры таким методом будет зависеть ещё и от точности определения излучательной способности материала. Значения излучательной способности берутся из литературы и справочников, однако в литературе существует разброс данных, а также сама излучательная способность зависит от многих других факторов, которые могут вносить ошибки в определение температуры.

## 4. Спектральная излучательная способность материалов

### 4.1 Вольфрам

Как уже было сказано, точность определения температуры пирометрией зависит от точности определения спектральной излучательной способности исследуемого материала. Одним из главных факторов, влияющих на точность определения излучательной способности, является шероховатость исследуемой поверхности. В случае вольфрама шероховатость поверхности дополнительно возникает из-за неоднородной пластической деформации приповерхностного слоя образца при его термическом расширении и изменяется в процессах нагрева и остывания вольфрама. А так как литературные данные излучательной способности получены экспериментально, то их разброс может быть связан с изменением шероховатости во время экспериментов.

Чтобы определить влияние шероховатости поверхности на излучательную способность, и заодно рассмотреть возможный разброс данных, для этих целей был сделан обзор литературных данных по излучательной способности вольфрама. Затем на основе этих данных было сделано моделирование зависимостей сигналов фотодетекторов, используемых в экспериментах, в случае разброса данных и в случае шероховатой поверхности по формуле (3). Для моделирования излучательная способность полированной поверхности вольфрама была взята из работы [7] в виде полинома:

$$\varepsilon(\lambda, T) = a_0 + a_1(T - T_0) + (b_0 + b_1(T - T_0) + b_2(T - T_0)^2)(\lambda - \lambda_0) + (c_0 + c_1(T - T_0))(\lambda - \lambda_0)^2 \quad (5)$$

Этот полином получен из экспериментальной работы [8] путём интерполяции данных. Излучательную способность вольфрама в таком виде удобно использовать в различных математических моделированиях и в теоретических расчётах. В исходной работе измерения были сделаны в диапазоне от 300 К до

2800 К и в диапазоне длин волн от 0,35 мкм до 2,7 мкм, соответственно, и полином (5) может быть использован в этих же диапазонах.

В первом приближении можно считать, что изменение шероховатости меняет только интенсивность излучения, и не влияет на его спектральную зависимость, тогда изменение излучательной способности шероховатой поверхности относительно гладкой можно считать:

$$\varepsilon_r(\lambda, T) = k \cdot \varepsilon_p(\lambda, T) \quad (6)$$

Где  $\varepsilon_r$  – излучательная способность шероховатой поверхности,  $\varepsilon_p$  – излучательная способность гладкой полированной поверхности и  $k$  – коэффициент, характеризующий степень шероховатости поверхности.

В справочнике [9] собрана информация о спектральных излучательных способностях вольфрама, измеренных экспериментально и опубликованных в различных статьях. В дальнейшем, в этом справочнике анализировались и исследовались излучательные способности только для гладких и полированных поверхностей вольфрамовых образцов на предмет разброса экспериментальных значений. Так как в дальнейшем при моделировании излучательной способности полированной поверхности брался полином (5), то в дальнейшем оценивался максимальный разброс относительно него. Как

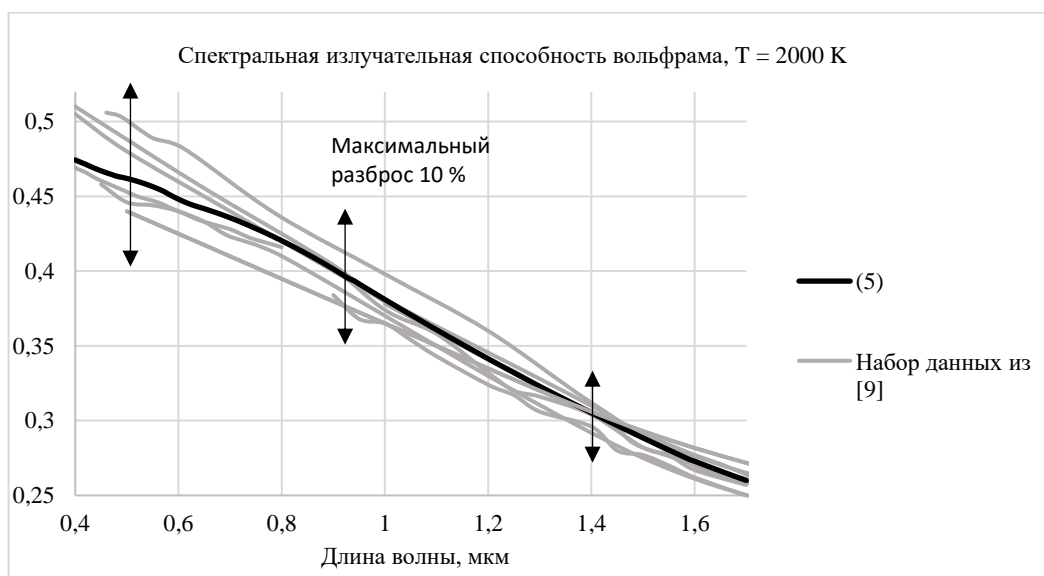


Рис. 9. Черная кривая – излучательная способность на основе полинома (5), серые кривые – набор данных из справочника [9]



видно из рис. 9, где нанесены полином (5) и данные из справочника [9] для температуры 2000 К, выполняется закон (6). Для этой температуры найден максимальный разброс данных, равный 10%, что соответствует  $k = 1.1$  из формулы (6), что можно в дальнейшем применить для оценки максимальной ошибки определения температуры, связанной с разбросом экспериментальных данных.

Особый интерес представляют данные, опубликованные в статье [10], так как в ней дополнительно измерены и указаны численные значения шероховатости поверхностей различных вольфрамовых образцов.

Шероховатость поверхности может быть охарактеризована различными способами, но на практике чаще всего используют две величины – среднеарифметическое значение  $R_a$ :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (7)$$

и среднеквадратическое  $R_q$ :

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y(x)^2 dx} \quad (8)$$

Где  $y(x)$  – функция отклонения профиля от средней линии  $m$ ,  $l$  – базовая длина, как показано на рис. 10 [11].

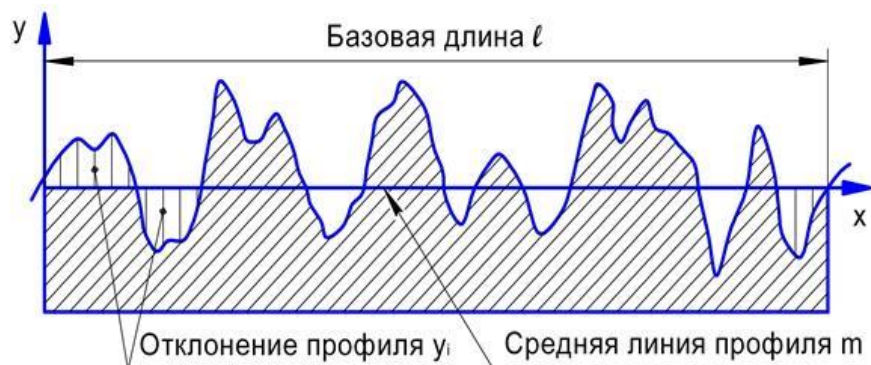


Рис. 10. Профиль шероховатой поверхности.

Стоит отметить, что в экспериментах на БЕТА по измерению температуры шероховатость поверхностей вольфрамовых образцов после их облучения электронным пучком были измерены на профилометре, что показало, что обычно шероховатость не превышала  $R_a = 25$  нм (примерно  $R_q = 40$  нм) [5], и ожидается, что в экспериментах с лазерным нагревом на стенде будут те же величины.

В [10] опубликованы экспериментальные данные по излучательной способности вольфрамовых образцов с измеренными значениями шероховатости:  $R_q = 38$  нм и  $R_q = 432$  нм. Соответственно, эти данные полезны для моделирования точности определения температуры для вольфрамовых образцов на лазерном стенде, так как первое значение шероховатости близко к ожидаемому, а второе позволяет сделать точно такие же оценки точности, только для более широкого диапазона шероховатости. Данные из [10] представлены на рис. 11 для температур 1208 К и 1603 К для разной шероховатости поверхности в сравнении с полированной поверхностью, излучательные способности которых были вычислены по (3) для тех же температур. Имеющиеся данные позволяют сделать моделирование уровней

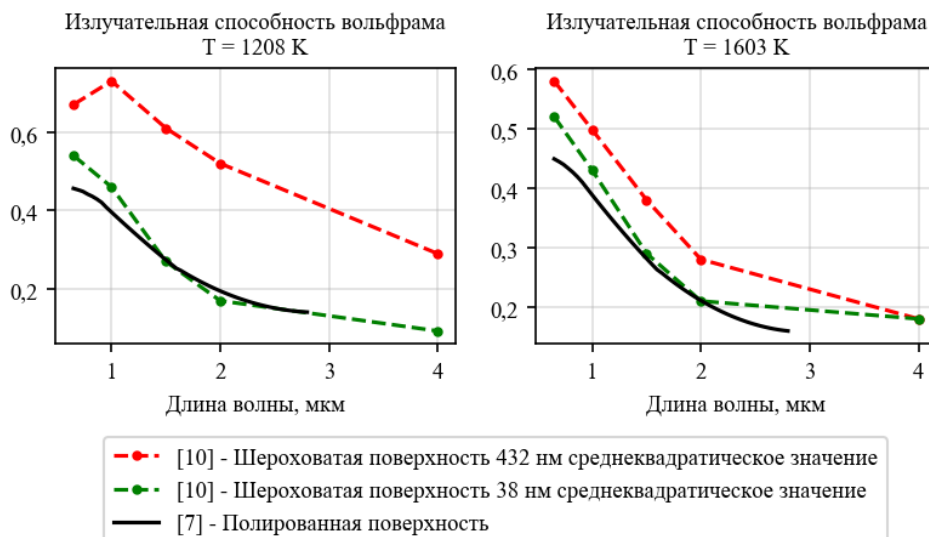


Рис. 11. Сравнение спектральных излучательных способностей вольфрама при разных температурах (1208 К слева и 1603 К справа) для полированной поверхности [7] и шероховатой поверхности со среднеквадратическим значением 435 нм и 38 нм [10].

сигналов для детекторов для разных шероховатостей, и сделать оценку точности определения температуры.

## 4.2 Карбид Бора

В случае измерения температуры поверхности образца из  $B_4C$  важно знать его спектральную излучательную способность, так как было сказано ранее, что для него не было возможности прокалибровать систему диагностики, и необходим теоретический расчёт уровня сигнала. Как и в случае с вольфрамом был сделан обзор литературы на предмет экспериментальных данных излучательных способностей карбида бора. Однако на текущий момент достаточно малое количество данных присутствует в литературе, которые вдобавок покрывают разные и не пересекающиеся с друг другом диапазоны длин волн и температур. Поэтому предлагается использовать линейную интерполяцию для данных, чтобы покрыть те диапазоны, для которых излучательная способность карбида бора недоступна. Еще недостаток малого количества данных заключается в том, что нельзя сделать оценку их разброса, не говоря уже о том, что не было найдено каких-либо данных для шероховатых поверхностей. Однако, в теоретическом моделировании можно специально задать какую-то величину разброса, чтобы иметь представление о том, как изменение излучательной способности поверхности может влиять на точность определения температуры. В [12] опубликованы экспериментальные данные спектральной излучательной способности  $B_4C$  при 755 K в диапазоне длин волн от 1,56 мкм до 12,4 мкм. В [13] данные в диапазоне от 2 мкм до 15 мкм для температуры 1900 K. В статье [14] опубликованы экспериментальные данные комплексных коэффициентов преломления для карбида бора при

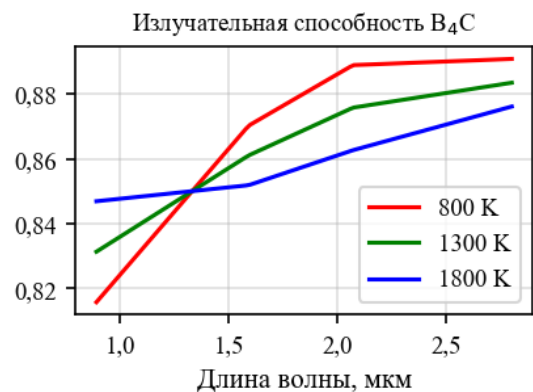


Рис. 12. Излучательная способность  $B_4C$

комнатной температуре в диапазоне от 0,3 мкм до 5 мкм. Значения коэффициентов преломления можно использовать для определения спектральной излучательной способности образца, который находится в среде без поглощения (в вакууме) [6]:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{4n(\lambda, T)}{(n(\lambda, T) + 1)^2 + k(\lambda, T)^2} \quad (7)$$

Где  $n$  и  $k$  это  $\bar{n} = n - ik$  – вещественная и мнимая компоненты коэффициента преломления исследуемого образца. Найденные данные для В<sub>4</sub>С, а также интерполяция между ними указаны на рис. 12, также позволяют в дальнейшем сделать некоторые оценки точности определения температуры.

## 5. Моделирование уровня сигнала фотодетекторов

### 5.2 Вольфрам

На основе полинома (3) из работы [7] моделировалась зависимость сигналов камеры Xenics XSW-320 и фотодиода Thorlabs PDA10DT от температуры полированной поверхности вольфрамового образца. Как было уже сказано, максимальный коэффициент пропорциональности, характеризующий степень шероховатости поверхности, оценивался в  $k = 1,1$  из разброса экспериментальных данных. Это значение использовалось в дальнейшем для оценки точности определения температуры камерой и фотодиодом. Затем, на основе данных из [10] моделировался уровень сигнала для шероховатых поверхностей с разными среднеквадратическими значениями ( $R_q = 38$  нм и  $R_q = 432$  нм) и сравнивались с моделированием для полированной поверхности. Результаты моделирования уровня сигнала камеры и фотодиода показаны на рис. 13.

Как видно из графиков на рис. 13, ошибка определения температуры поверхности, связанная с разбросом данных излучательной способности, примерно одинаковая, что в случае камеры, что в случае фотодиода, и возрастает с ростом температуры, достигая значения 6% при температуре 2800 К. Ошибка определения температуры камерой для шероховатой поверхности при  $R_q = 38$  нм примерно находится в пределах ошибки, связанной с разбросом данных и не превышает 5%, а для  $R_q = 432$  нм ошибка может превышать значение в 10%. Для фотодиода ошибка, связанная с шероховатостью поверхности при  $R_q = 38$  нм, незначительно превышает ошибку, связанную с разбросом данных (около 5%), а при  $R_q = 432$  нм данная ошибка может превышать значение в 17%. Эти результаты означают, что малая шероховатость поверхности, которая наблюдалась в экспериментах на БЕТА, слабо влияет на точность определения температуры, так как гораздо больший

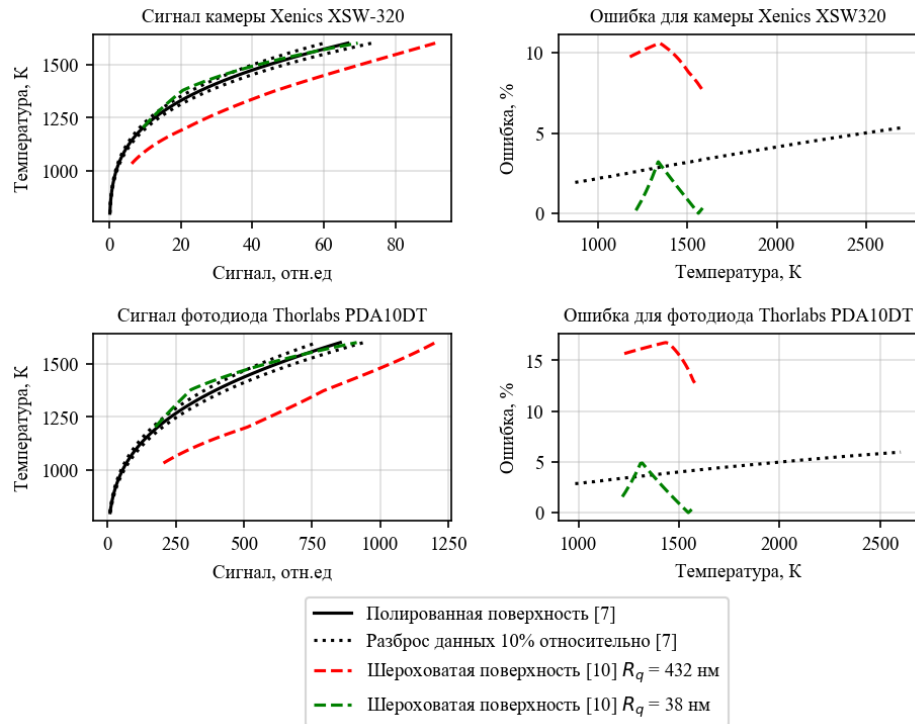


Рис. 13. Моделирование сигналов камеры Xenics XSW-320 (сверху слева) и фотодиода Thorlabs PDA10DT (снизу слева) для вольфрамового образца, ошибки определения температуры, связанная с разбросом данных, и ошибка для шероховатой поверхности (справа).

вклад будут давать инструментальные ошибки и ошибки, связанные с неточным измерением геометрии стенда. Однако в случае больших значений шероховатость может заметно повлиять на точность.

### 5.3 Карбид Бора

Как и в случае с вольфрамом, на основе данных из работы [12], [13], [14] и линейной интерполяции моделировались зависимости сигналов камеры Xenics XSW-320 и фотодиода Thorlabs PDA10DT от температуры поверхности образца из  $W_4C$ . Так как неизвестен разброс, то было решено смоделировать точно такой же, какой был в случае с вольфрамом – 10 %. Так как известная спектральная излучательная способность из литературы составляет порядка 0,8 - 0,9, то также было решено сравнить зависимость сигнала для  $W_4C$  с чернотельным ( $\epsilon(\lambda, T) = 1$ ). Это также и моделировало случай отсутствия каких-либо данных по  $W_4C$ , то есть позволяло определить ошибку, относительно использования для расчётов чёрного тела.

Как видно из результатов моделирования на рис. 14, ошибка, связанная с 10% разбросом, увеличивается с ростом температуры и достигает значения 4% для камеры и 5% для фотодиода при 1800 К. Относительно чёрного тела ошибка также увеличивается и равна 5% для камеры и 7% для фотодиода. Получившиеся результаты говорят о том, что ошибка, связанная с 10% разбросом данных, мало влияет на точность определения температуры  $B_4C$ , а в случае отсутствия данных по излучательной способности и определения температуры по чернотельному излучению, ошибка тоже будет незначительной.

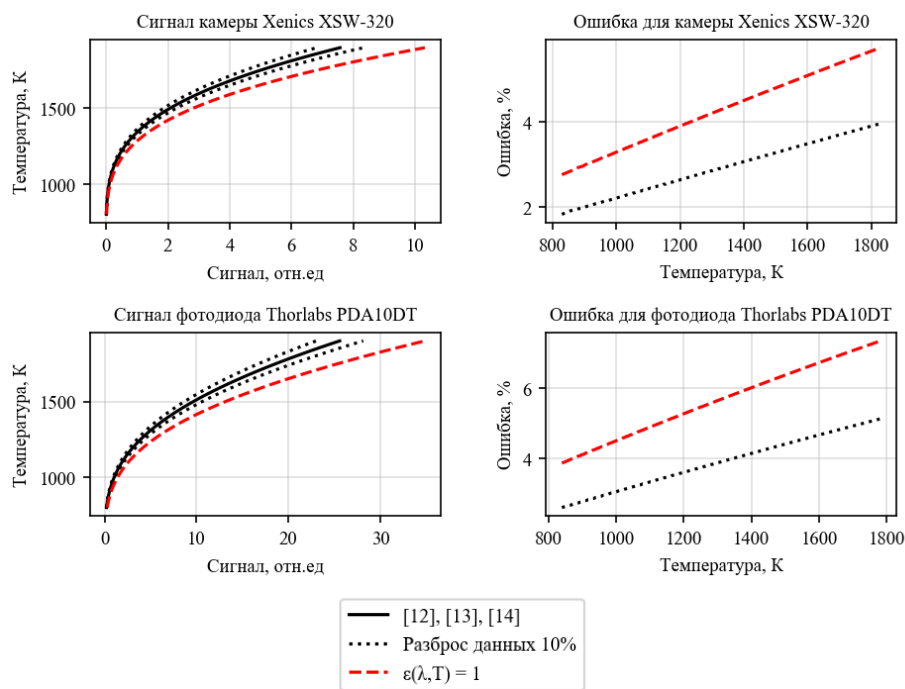


Рис. 14. Моделирование сигналов камеры Xenics XSW-320 (сверху слева) и фотодиода Thorlabs PDA10DT (снизу слева) для карбида бора и чёрного тела, ошибки определения температуры, связанные с 10% разбросом данных, и ошибка, относительной чёрного тела (справа).

## 6. Результаты экспериментов

На рис. 15 показаны результаты измеренного пространственного распределения температуры поверхности вольфрамового образца, сделанного с помощью откалиброванной камеры Xenics XSW-320, и временного с помощью откалиброванного фотодиода Thorlabs PDA10DT. Геометрия стенда была такова, что камера фиксировала яркость с разрешением 0,08 мм. Снимок камеры сделан с экспозицией 20 мкс в момент времени 720 мкс, что отмечено линией на графике. Как видно из-за особенности конструкции лазера, распределение его интенсивности на выходе не равномерно, как и получаемое пространственное распределение температуры на образце, поэтому сложно сравнить итоговые результаты, измеренные камерой и фотодиодом.

Для решения проблемы неравномерного распределения интенсивности лазера было предложено использовать рассеиватель, как показано на рис. 16. Рассеиватель и диафрагму можно было перемещать вдоль направления

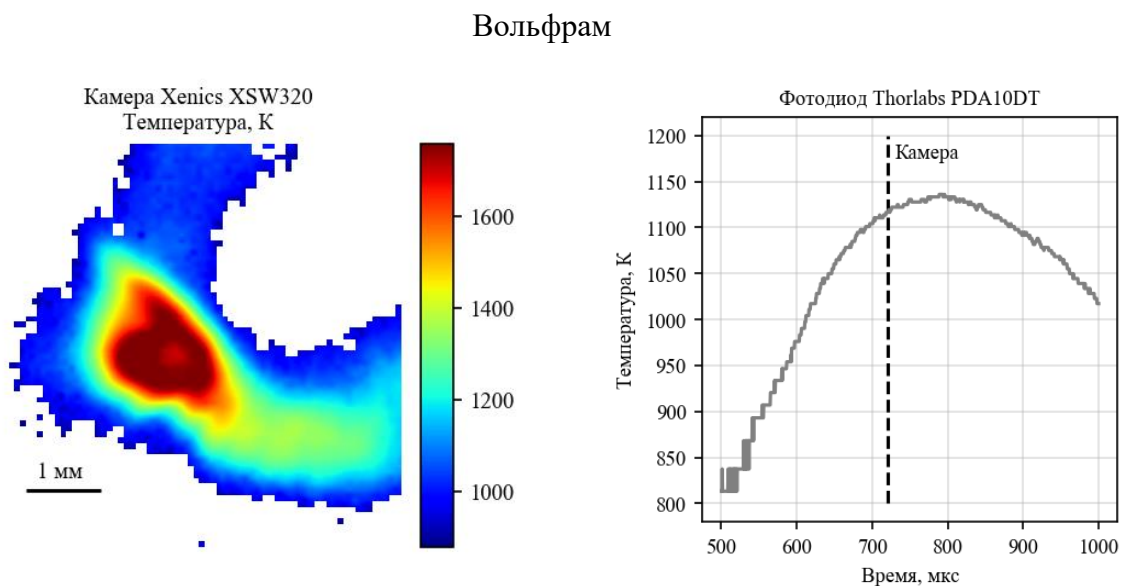


Рис. 15. Сравнение измеренных температур на вольфрамовом образце с помощью камеры Xenics XSW-320 (слева) и фотодиода Thorlabs PDA10DT (справа) без рассеивателя. Снимок с камеры сделан в момент времени, обозначенный на графике температуры с фотодиода (720 мкс).



распространения лазерного луча от линзы до вакуумной камеры, а также была возможность использовать диафрагмы с разным диаметром отверстия, что позволяло изменять параметры нагревающего лазерного луча – поперечный размер и интенсивность.

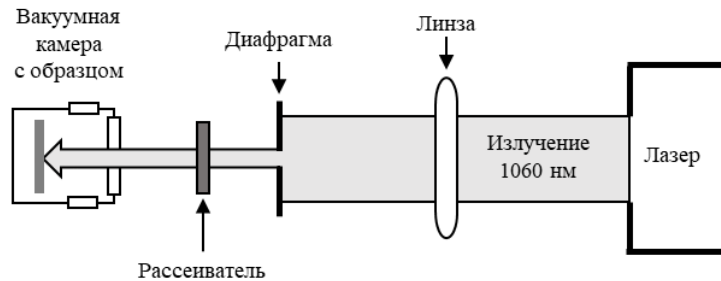


Рис. 16. Оптическая схема для лазерного луча

На рис. 17 показаны те же самые результаты, только в случае использования рассеивателя. Геометрия в этом эксперименте была такова, что пространственное разрешение для температуры составляло 0,044 мм. Как видно на снимке, получившаяся температура поверхности составляет порядка 1500 К, в то же время температура по фотодиоду в момент времени снимка составляет 1600 К. Также на снимке есть неоднородность распределения температуры порядка 100 - 150 К, которая может быть связана, как и с неравномерным распределением лазера, так и с неоднородностью поверхности. Перед экспериментом поверхность вольфрамового образца была отполирована, и на микроскопе были заметны борозды, оставшиеся на поверхности после обработки, которые были в ширину порядка 1 мм, что тоже соответствует размеру температурной неоднородности. Поэтому необходимо дальнейшее исследование распределения интенсивности излучения, чтобы выяснить, с чем связано итоговое распределение температуры.

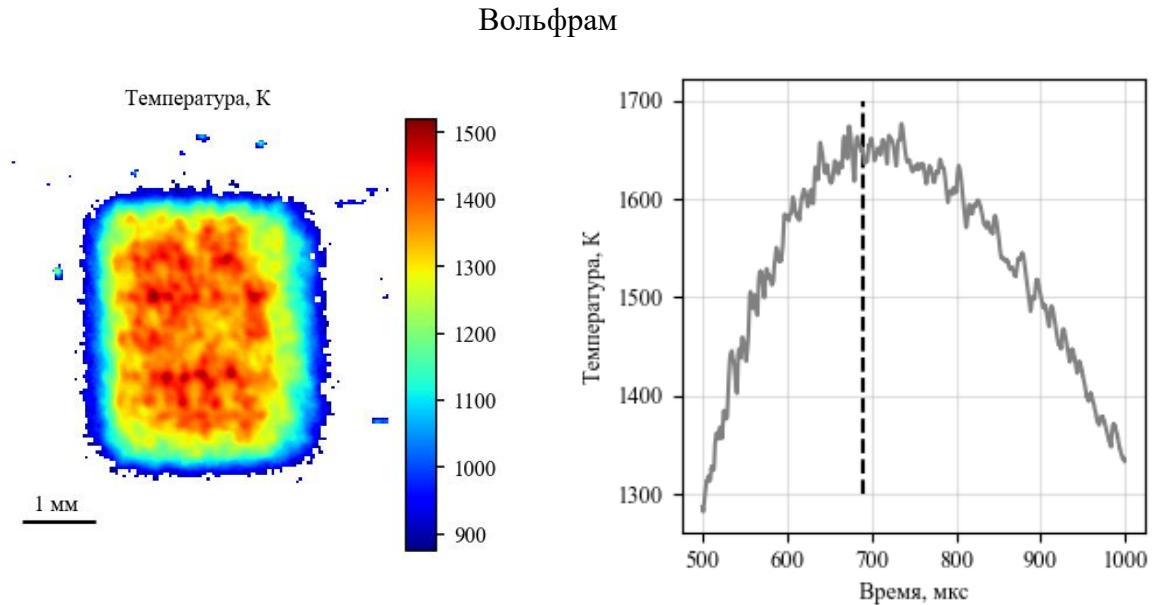


Рис. 17. Результаты измеренных температур поверхности вольфрама с помощью камеры (слева) и фотодиода (справа) с использованием рассеивателя. Снимок с камеры сделан в момент времени 690 мкс с экспозицией 40 мкс.

На рис. 18 представлены результаты измерения температуры поверхности образца из  $W_4C$  с разрешением 0,044 мм. На снимке видно неоднородное распределение температуры с яркими сильно нагретыми точками, температура которых может превышать почти на 30% окружающую – на приведенном снимке температура в ярких точках может превышать 1600 К, в то время как окружающая температура вокруг этих точек порядка 1200 К. Это может быть связано с деформацией поверхности во время нагрева и образования некоторых выступов над поверхностью, которые сильно перегреваются в ходе их облучения, возможно, это связано с тем, что на образце есть малые части, которые слабо связаны с основной его частью, но необходимо также дальнейшее исследование состояния поверхности и самого материала.

## Карбид Бора

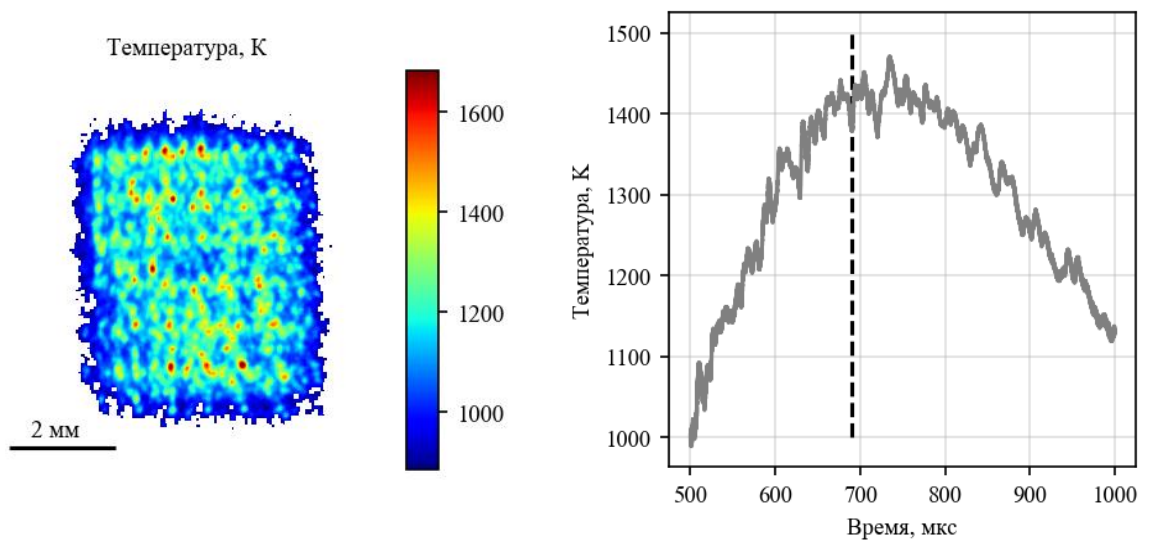


Рис. 18. Результаты измеренных температур поверхности В<sub>4</sub>С с помощью камеры (слева) и фотодиода (справа) с использованием рассеивателя. Снимок с камеры сделан в момент времени 690 мкс с экспозицией 40 мкс.

## 7. Сравнение с теорией

Температуру, измеренную пирометрическим методом на стенде, можно сравнить с теоретическими расчётами, которые можно сделать, используя термодинамические параметры материалов образцов, энергию лазера в импульсе и одномерное уравнение теплопроводности:

$$\frac{du(x, t)}{dt} - a \frac{d^2u(x, t)}{dx^2} = f(x, t) \quad (10)$$

Где  $u(x, t)$  – функция температуры в точке  $x$  и в момент времени  $t$ , направление координаты  $x$  соответствует направлению вглубь образца,  $f(x, t)$  – функция источников тепла и  $a$  – коэффициент температуропроводности, который равен:

$$a = \frac{\kappa}{c_p \rho} \quad (11)$$

$\kappa$  – теплопроводность материала,  $c_p$  – удельная теплоёмкость при постоянном давлении и  $\rho$  – плотность. Решение уравнения (10) также позволяет рассчитывать распределение температуры в глубину мишени и её изменение со временем, что позволяет моделировать распределение температуры вглубь образца непосредственно во время процессов нагрева и остывания в случае однородного распределения лазера по площади.

Соответственно, для расчёта температуры была поставлена серия экспериментов с определением энергии в одном импульсе. Сама энергия в импульсе зависит от напряжения на конденсаторах, из которых состоит блок питания лазера. Была проведена серия экспериментов на стенде, схема которых показана на рис. 19. С учётом отражения луча от двух поверхностей для длины волны 1060 нм коэффициент отражения для этого стекла составляет примерно 0,1 для угла

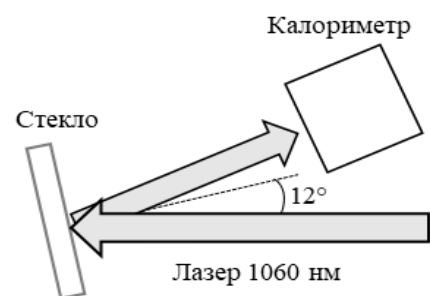


Рис. 19. Определение энергии в импульсе

падения  $12^\circ$ . Лазерный луч после отражения направлялся в калориметр, который определял энергию в импульсе. Итоговые результаты показаны в таблице, где энергия пересчитана с учётом отражения. Непосредственно во время экспериментов с нагревом

Таблица значений напряжений на конденсаторных батареях и полная энергия лазера в импульсе	
Напряжение на конденсаторах, кВ	Энергия в импульсе, Дж
2,4	4
2,5	6
2,6	8
2,7	10
2,8	13

мишеней использовался лавинный фотодиод, который записывал временной ход интенсивности лазерного импульса, а перед выстрелом конденсаторные батареи заряжались до различных напряжений, указанных в таблице. По известным значениям энергии импульса из таблицы, значениям площади образца, которая подверглась облучению и которая определялась по снимкам и по значению времени импульса, которое было записано лавинным фотодиодом, определялась плотность мощности лазерного излучения на поверхности мишени, считая пространственное распределение интенсивности равномерным. На рис. 20 показан пример временного хода интенсивности лазерного импульса, пересчитанный в плотность мощности для равномерного распределения в экспериментах по нагреву при полной энергии в импульсе 14,4 Дж, длительности импульса 800 мкс и площади облучения  $12 \text{ мм}^2$ .



Рис. 20. Временной ход интенсивности лазера, пересчитанный в плотность мощности для однородного распределения.

Временной ход плотности мощности затем подставлялся в (10), а термодинамические константы подставлялись в (10) в зависимости от типа материала в эксперименте. Также учитывалось, что не все излучение поглощается образцом, для упрощения расчёта брался постоянный коэффициент поглощения. Например, для вольфрама использовался коэффициент поглощения 0,45, а для  $W_4C$  – 0,6. Получившееся решение сравнивалось с временным ходом температуры, измеренным фотодиодом. На рис. 21 показано сравнение температуры, измеренной фотодиодом и расчётные значения для вольфрамового образца. Профиль нагревающего лазера в эксперименте соответствовал показанному на рис. 21. Как видно на графике, расчётные максимальные температуры, достигнутые в процессе нагрева, с хорошей точностью совпадают с экспериментальными измерениями: в эксперименте получено значение 1675 К, а в расчёте 1665 К. Последующая разность температур при остывании можно объяснить тем, что в расчётной модели не учитываются потери тепла через крепление, на котором держался образец.

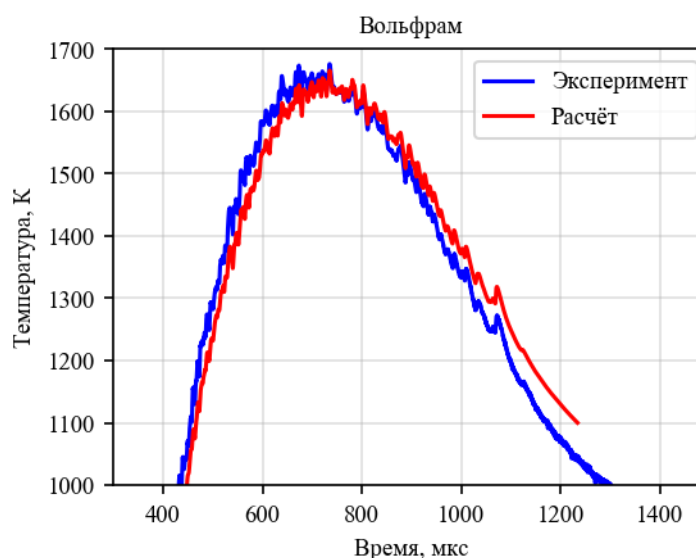


Рис. 20. Сравнение измеренной и смоделированной температур для вольфрамового образца

Так как ранее задача (10) не решалась для  $W_4C$ , то для этой цели были собраны экспериментальные термодинамические данные из справочника [15] – теплопроводность, теплоёмкость и плотность, которые зависят от

температуры материала. Для данных, опубликованных в справочнике [15] подобраны функции, описывающие их зависимости от температуры. Для теплоёмкости в расчётах использовалась функция:

$$c_p(T) = 494 + 1,66 \cdot T - 339 \cdot 10^{-6}T \quad (12)$$

Данная функция описывает теплоёмкость В<sub>4</sub>С при постоянном давлении в диапазоне температур от 300 К до 2400 К, которая возрастает с увеличением температуры от 800 Дж/кг·К до 2500 Дж/кг·К. Для теплопроводности использовалась функция:

$$\kappa(T) = 23,73 - 0,0065 \cdot T + 1,34 \cdot (T/1000)^2 + \frac{2217}{T} \quad (13)$$

Уравнение (13) описывает теплопроводность В<sub>4</sub>С в диапазоне температур от 300 К до 2400 К, которая уменьшается от 30 Вт/м·К до 15 Вт/м·К с увеличением температуры. Плотность В<sub>4</sub>С была пересчитана на основе коэффициента линейного расширения. В справочнике [1515] этот коэффициент равен  $6 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>. Известно, что плотность пересчитывается:

$$\rho(T) = \frac{\rho_0}{1 + 3\alpha(T - T_0)} \quad (14)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения,  $\rho_0$  – плотность материала при температуре  $T_0$ . Функция (14) позволяет получить итоговую зависимость плотности материала от температуры. При комнатной температуре плотность В<sub>4</sub>С равна 2520 кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент поглощения в расчётах был равен 0,6. На основе этих данных, уравнений (10), (12), (13) и (14) и временного профиля нагревающего лазера из рис. 22 был смоделирован временной ход температуры. Результат показан на рис. 23. Видно, что расчётная и экспериментальная максимальные температуры достаточно близки: 1471 К в эксперименте и 1434 К расчётная. Наблюдается также несовпадение температур при моделировании остывания, как и в случае с вольфрамом, которое также может быть связано с не учётом потерь тепла через крепление образца.



Рис. 22. Временной профиль нагревающего лазера в эксперименте с В<sub>4</sub>С

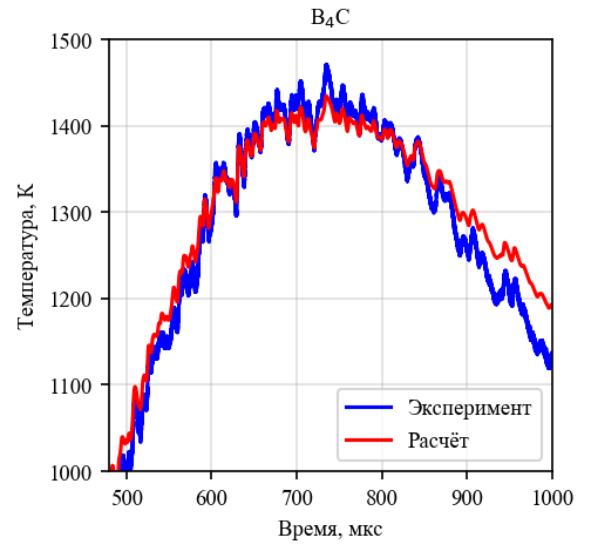


Рис. 23. Сравнение экспериментальной и расчётной температур для образца из В<sub>4</sub>С.



## 8. Заключение

В ИЯФ СО РАН был разработан специальный экспериментальный стенд, где в качестве инструмента моделирования импульсных тепловых нагрузок используется лазерный импульс. На данном стенде был разработан радиационно-пирометрический метод определения температуры, и с помощью него впервые была определена температура облучаемых образцов непосредственно во время процесса нагрева (*in situ*). В экспериментах использовались инфракрасная камера и инфракрасный фотодиод, благодаря которым температура может быть определена как с высоким пространственным разрешением (до 0,04 мм), так и с высоким временным (до 2 мкс). В качестве образцов использовался металлический из вольфрама, и керамический из В<sub>4</sub>С. В<sub>4</sub>С был использован в силу своей распространённости и для настройки оборудования на стенде для дальнейших экспериментов с другими керамическими материалами.

В ходе выполнения работы была исследована точность пирометрического метода измерения температур для вольфрамовых образцов. Одним из основных факторов, влияющим на точность этого метода, является шероховатость поверхности, которая изменяется в процессах нагрева и остывания и влияет на излучательную способность поверхности материала. Вопрос влияния шероховатости достаточно редко исследуется, поэтому существует мало работ, посвящённых этой проблеме, и точность измерения температуры пирометрией вызывает вопросы. Поэтому, в ходе настоящей работы был сделан обзор литературных экспериментальных данных по спектральным излучательным способностям вольфрама. Было выяснено, что в литературных данных для полированных поверхностей вольфрама существует разброс, который может достигать 10% и может быть связан с изменением шероховатости поверхности во время экспериментов. Помимо этого, в литературе найдены экспериментальные данные по излучательной способности поверхностей вольфрама с измеренной его шероховатостью, которые могут быть использованы для различных теоретических расчётов. В

дальнейшем все данные по разбросу и для шероховатых поверхностей были использованы для теоретических расчётов точности измерения температуры поверхности вольфрамовых образцов.

Точность измерения температуры  $W_4C$  пирометрией тоже вызывала вопросы, так как до сих пор не было моделей, которые описывали его излучательную способность в широких диапазонах температур и длин волн. В ходе настоящей работы была создана эта модель на основе экспериментальных данных из нескольких различных источников, которые были получены в разных диапазонах температур и длин волн, а также с использованием интерполяции между данными. Несмотря на то, что до сих пор существует малое количество экспериментальных данных по излучательной способности  $W_4C$ , и в следствие, отсутствие какого-либо разброса или информации для шероховатых поверхностей, в моделировании точности измерения температуры был заложен 10% разброс данных, аналогичный вольфраму. В дополнение, при моделировании измеренной температуры  $W_4C$ , она сравнивалась с чернотельной, чтобы иметь представление об ошибке, в случае отсутствия каких-либо данных для  $W_4C$ .

В экспериментах на стенде в качестве детекторов использовались инфракрасная камера Xenics XSW-320 и инфракрасный фотодиод Thorlabs PDA10DT. На основе имеющихся спектральных чувствительностей этих детекторов и имеющихся данных по излучательной способности вольфрама и  $W_4C$  моделировались зависимости сигналов фотодетекторов от измеряемой ими температуры поверхности. Моделирование показало, что и для камеры, и для фотодиода, разброс данных излучательных способностей для полированных поверхностей вольфрама, имеющийся в литературе, не даёт значительного вклада в ошибку определения температуры – она не превышает 6% при высоких температурах порядка 2500 К и в случае измерений камерой, и в случае измерений фотодиодом. Моделирование для шероховатой поверхности  $R_q = 38$  нм, показало, что для камеры максимальная ошибка

определения температуры составляет около 3%, а для фотодиода – 5%, а для шероховатости  $R_q = 432$  нм, показало, что для камеры максимальная ошибка определения температуры равняется 11%, а для фотодиода – 17%. Эти результаты говорят о том, что при больших значениях шероховатость может серьезно повлиять на точность определения температуры, однако известно, что в экспериментах на БЕГА, такие большие значения шероховатости не достигались и были не более  $R_q = 40$  нм, а это значит, что малая шероховатость поверхности образцов, которая могла быть в экспериментах на стенде, не имеет значительного влияния на точность пирометрии. Моделирование аналогичного разброса данных для В<sub>4</sub>С показало, что ошибка не превышает 5% для температур порядка 1800 К и для камеры и фотодиода. В случае отсутствия данных по излучательной способности для В<sub>4</sub>С моделирование показало, что при сравнении с чернотельным излучением, ошибка измерения температуры для камеры будет 6%, а для фотодиода – 7%, что говорит о том, что незнание излучательной способности В<sub>4</sub>С не будет вносить очень существенный вклад в точность измерения температуры.

Температуру поверхности образцов во время облучения и после него можно смоделировать, зная значения интенсивности нагревающего луча, его временной профиль, а также термодинамические свойства материалов, из которых созданы образцы. Моделирование показало, что максимальные температуры, достигнутые в ходе облучения мишеней и измеренные в эксперименте, достаточно близки с расчётными. Для вольфрама различие температур обычно не превышало 1%, для В<sub>4</sub>С не превышало 2,5%, что находится в пределах расчётной точности, связанной с разбросом данных излучательной способности.

Результаты данной работы показали, что пирометрия может быть применена для измерения температуры *in situ* при использовании лазерного излучения в качестве инструмента моделирования термоудара, и этот метод может быть использован для измерения температуры различных материалов.

## 9. Список литературы

1. Tomabechi K. et al. ITER: design overview //Journal of nuclear materials. – 1991. – Т. 179. – С. 1173-1178.
2. Leonard A. W. Edge-localized-modes in tokamaks //Physics of Plasmas. – 2014. – Т. 21. – №. 9. – С. 090501.
3. Pitts R. A. et al. Physics basis for the first ITER tungsten divertor //Nuclear Materials and Energy. – 2019. – Т. 20. – С. 100696.
4. Abrams T. et al. Evaluation of silicon carbide as a divertor armor material in DIII-D H-mode discharges //Nuclear Fusion. – 2021. – Т. 61. – №. 6. – С. 066005.
5. Vyacheslavov L. N. et al. Diagnostics of the dynamics of material damage by thermal shocks with the intensity possible in the ITER divertor //Physica Scripta. – 2018. – Т. 93. – №. 3. – С. 035602.
6. John R. Howell, M. Pinar Mengüç, Robert Siegel. Thermal Radiation Heat Transfer. 5 ed. – Boca Raton: «Taylor & Francis Group», 2010. – 949 p.
7. Pon R. M., Hessler J. P. Spectral emissivity of tungsten: analytic expressions for the 340-nm to 2.6- $\mu\text{m}$  spectral region. Applied Optics. – 1984. – V. 23. – №. 7. – P. 975 - 976.
8. DeVos, J. C. A new determination of the emissivity of tungsten ribbon. Physica, 20, P. 690-714, 1954.
9. Touloukian Y. S., DeWitt D. P. Thermophysical properties of matter - the TPRC data series. Volume 7. Thermal radiative properties - metallic elements and alloys. Data book. United States: N. p., 1970.
10. Rolling R. E., Funai A. I., Grammer J. R. Investigation of the effect of surface condition on the radiant properties of metals. 1964 Technical report No. AFML-TR-64-3636
11. ГОСТ Р ИСО 4287—2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. - Введ. 2016-01-01. - М.: Стандартиформ, 2012. - 18 с.

12. Johnson P. E., DeWitt D. P., Taylor R. E. Method for measuring high temperature spectral emissivity of nonconducting materials //AIAA Journal. – 1981. – T. 19. – №. 1. – C. 113-120.
13. Hayes R. J. Determination of the Emissivity of Materials. Quarterly Progress Report, October 1 through December 31, 1962. – Pratt and Whitney Aircraft Div., United Aircraft Corp., Hartford, Conn., 1963. – №. PWA-2163.
14. Larruquert J. I. et al. Self-consistent optical constants of sputter-deposited B<sub>4</sub>C thin films //JOSA A. – 2012. – T. 29. – №. 1. – C. 117-123.
15. Pierson H. O. Handbook of refractory carbides & nitrides: properties, characteristics, processing and applications. – William Andrew, 1996.