

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 **ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ**

Направление подготовки **03.03.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **БАКАЛАВРИАТ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Черепанова Дмитрия Евгеньевича

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы Подготовка методики обнаружения подповерхностных разрушений, образованных при быстром нагреве поверхности вольфрама

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

д-р физ.-мат. наук,

профессор

Иванов А. А./.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....2018 г.

Научный руководитель

д-р физ.-мат. наук,

г.н.с., ИЯФ СО РАН

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

«.....».....2018 г.

Дата защиты: «.....».....2018 г.

Оглавление

1	Введение	3
2	Экспериментальная установка	6
3	Методика определения температуры	8
3.1	Излучение серых тел	8
3.2	Излучательная способность вольфрама	9
3.3	Методика расчета температуры	11
4	Калибровка и настройка средств диагностики	14
4.1	Калибровка ленточной лампы СИ-10-300	15
4.2	Проверка характеристик камер	19
4.3	Калибровка системы диагностики	23
5	Анализ результатов	27
6	Заключение	30
	Список литературы	31
	Приложение	32

1. Введение

Одной из наиболее серьезных проблем токамака ITER считается ряд негативных воздействий со стороны дивертора (рис. 1) вследствие возникновения неустойчивостей в ходе удержания плазмы. Дивертор – элемент токамака, предназначенный для приема и нейтрализации частиц плазмы, вышедшей из зоны удержания. Он располагается вни-

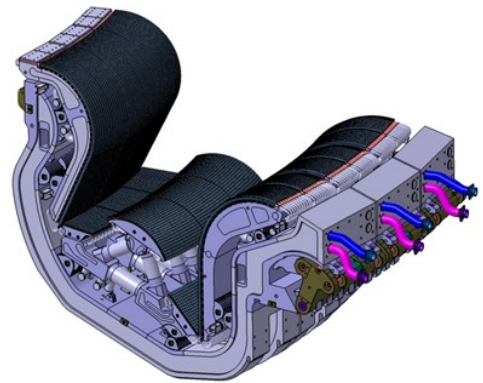


Рис. 1. Дивертор.

зу токамака под так называемой х-точкой – местом, где скрещиваются магнитные силовые линии, расположенные снаружи области удержания плазмы. Конфигурация поля устроена таким образом, что его силовые линии после скрещивания выходят наружу через стенки дивертора. Это позволяет направить частицы плазмы, покинувшие область удержания, на пластины дивертора для их сбора и нейтрализации.

Дивертор, как и другие обращенные к плазме элементы токамака, подвергается различного вида нагрузкам. Поскольку в токамаке ITER, как в прототипе реактора первого поколения, предполагается использовать дейтерий-тритиевое топливо, в ходе термоядерной реакции будет генерироваться нейтронный поток. Он будет создавать как непрерывный нагрев элементов токамака, так и вносить структурные изменения в металлы, из которых эти элементы выполнены. Кроме этого, на периферию плазмы из центра реакции будут непрерывно дрейфовать частицы, которые будут направляться полем в дивертор под малым углом (почти по касательной) к поверхности его стенок. Совокупность этих и других стационарных процессов по оценкам может создавать непрерывный поток тепла с плотностью мощности порядка 10 МВт/м^2 . Однако, помимо стационарного нагрева, дивертор будет подвергаться огромным импульсным нагрузкам, достигающих плотности мощности в 10 ГВт/м^2 . Такие нагрузки возникают в ходе появления неустойчивостей на периферии плазмы (ELM – edge localized mode [1]) при работе в h-моде, которая представляется наи-

более интересной для реализации в токамаке ITER. Неустойчивости типа ELM делятся на три типа, самым неприятным из которых является первый тип, несущий в себе большой объем тепловой энергии. Для борьбы с неустойчивостями типа ELM разрабатываются методы, однако пока проблема влияния экстремальных импульсных нагрузок, возникающих в результате плазменных неустойчивостей, на обращенные к плазме элементы видится не до конца решенной.

В настоящее время стенки дивертора токамака проекта ITER предполагается изготавливать из вольфрамовых пластин. Это связано с тем, что вольфрам – наиболее устойчивый к тепловым нагрузкам, мало поглощающий тритий и слабо активируемый нейтронным потоком металл. Это очень важные критерии и именно они являются основной причиной выбора вольфрама в качестве конструкционного материала для постройки дивертора токамака ITER. Однако использование этого металла для изготовления элементов, обращенных к плазме, несет в себе ряд проблем. Вольфрам является относительно хрупким материалом, и под воздействием импульсных нагрузок (поток тепла в ходе которых будет значительно превышать порог плавления металла), помимо плавления и испарения, он будет подвергаться растрескиванию, а с его поверхности могут отлетать микрочастицы, накапливаясь в токамаке в виде пыли. Так как одним из компонентов термоядерного топлива является радиоактивный изотоп водорода – тритий, он будет непрерывно накачиваться в вакуумную камеру токамака и адсорбироваться на поверхность микрочастиц вольфрама. Такой процесс несет в себе достаточно серьезную проблему в виде вероятности радиоактивного заражения атмосферы в случае разгерметизации реактора. Еще одной проблемой, возникающей вследствие протекания на поверхности стенок дивертора деструктивных процессов, является их влияние на параметры удерживаемой в токамаке плазмы. Энергии отлетающих с поверхности вольфрама микрочастиц (до 10 мкм) может хватить на то, что они попадут в область плазменного шнура, где начнется процесс ионизации атомов металла. В силу того, что вольфрам обладает большим зарядовым числом $Z = 74$, помимо затрат на ионизацию, будет также расходоваться большой объем энергии вследствие тормозного излучения его иона ($\sim Z_i^2$), что спровоцирует охлаждение плазмы.

В ходе экспериментов на установке ВЕТА (Beam of Electrons for material Test Applications) было обнаружено, что при нагреве на поверхности вольфрама, предназначенного для дивертора ITER, появляются ярко светящиеся горячие точки. Это говорит о том, что поверхность прогревается неравномерно. Предполагается, что это происходит по причине структурных особенностей вольфрама, которые локально затрудняют распространение тепла вглубь материала. При последующих импульсах нагрева одни горячие точки исчезают и появляются новые. Последующий анализ с помощью СЭМ показывает, что исчезновение горячих точек вызвано отделением слабо связанных частей материала от поверхности. Для более тщательного изучения этого процесса необходимо детальное исследование поверхности вольфрама во время нагрева и сразу после него.

Цель данной работы - подготовка системы диагностики для исследования поверхности вольфрама, подвергающегося импульсной тепловой нагрузке. В качестве измерительных приборов была выбрана система из двух ПЗС-камер SDU-285 и четырех лавинных фотодиодов С30659Е. Камеры нужны для определения распределения температуры по поверхности вольфрама, а их использование для этих целей объясняется большим пространственным разрешением. Лавинные фотодиоды предполагалось использовать для изучения временной эволюции температуры небольших участков на поверхности вольфрама. Чтобы иметь возможность получения количественных данных (температуры), было необходимо провести работу по проверке линейности характеристик камер, и откалибровать каждую камеру и каждый лавинный фотодиод на измерение в широком диапазоне температур.

2. Экспериментальная установка

Моделирование импульсных тепловых нагрузок производится на установке ВЕТА с использованием мощного электронного пучка. Схема установки представлена на рис. 2. Из плазменного разряда, зажигаемого в газонаполненном диоде, электрическим полем вытягиваются и ускоряются электроны, которые затем фокусируются с помощью системы магнитных катушек и попадают на поверхность мишени в виде вольфрамовой пластинки. Наблюдение за ее поверхностью производится с

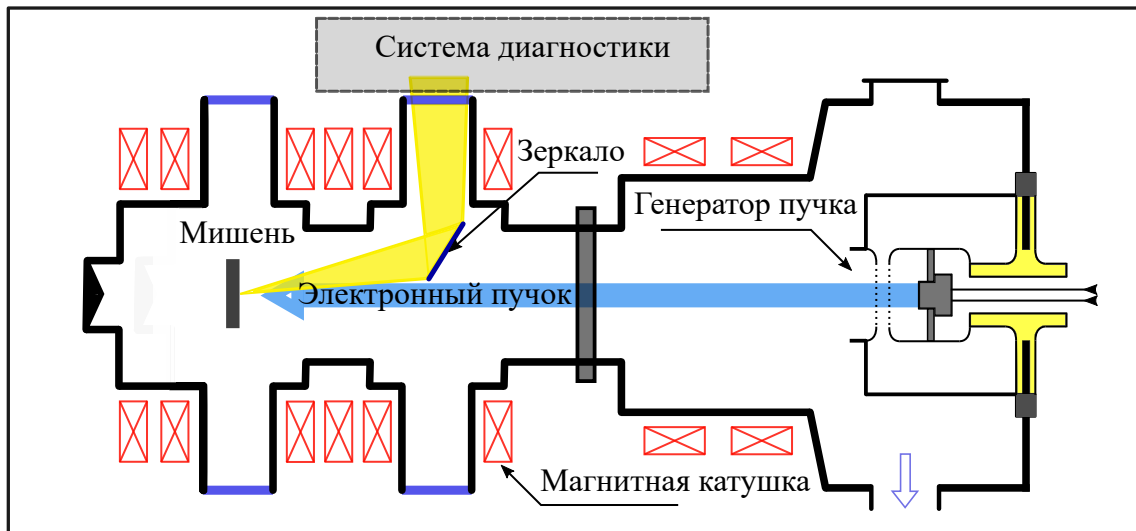


Рис. 2. Схема установки ВЕТА.

помощью системы зеркал, расположенных внутри вакуумной камеры, через диагностические окна. Основным преимуществом данной установки является возможность наблюдения за поведением исследуемого образца непосредственно во время облучения электронным пучком. Система генерации позволяет создавать пучок с мощностью до 7 МВт и длительностью до 300 мкс. Плотность мощности может достигать значения в 15 ГВт/м^2 , что позволяет смоделировать импульсные нагрузки, которые, как предполагается, будут иметь место при возникновении неустойчивостей на краю плазменного шнура в токамаке проекта ITER.

Оптическая схема системы диагностики по наблюдению за поверхностью исследуемой вольфрамовой пластинки изображена на рис. 3. Она содержит две камеры SDU-285 с оптическими фильтрами (необходимость использования фильтров будет выяснена далее) и линейку из четырех световодов, сигнал по которым проводится до лавинных фотодиодов, кото-

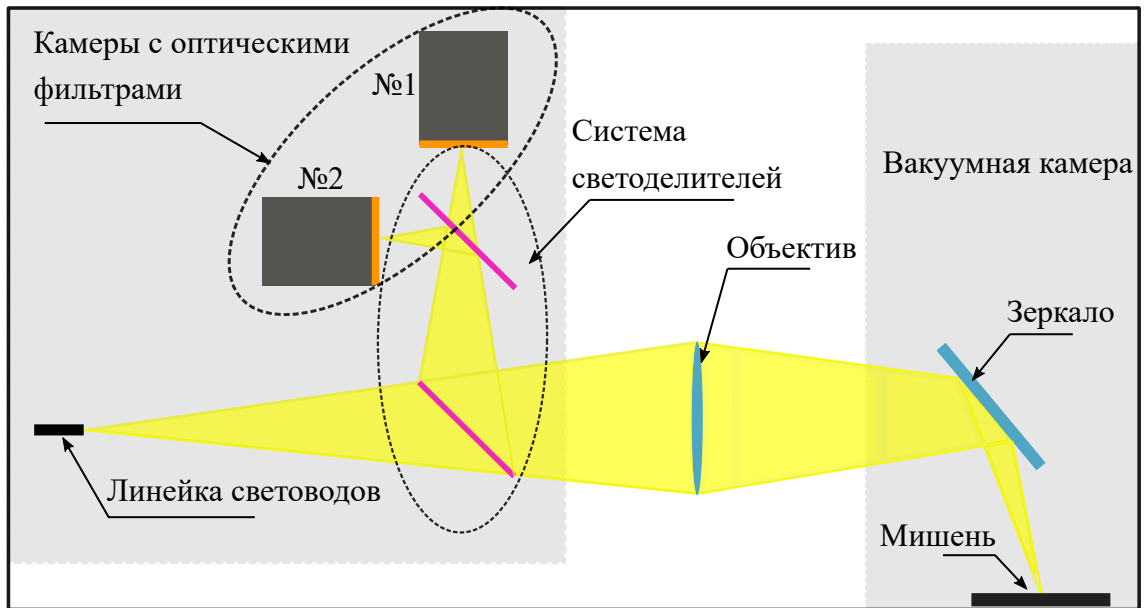


Рис. 3. Оптическая схема системы диагностики.

рые вместе с АЦП располагаются вдалеке от установки для избежания наводок. Изображение мишени строится на поверхности ПЗС-матриц камер и торцах световодов посредством системы, состоящей из зеркала, располагающегося внутри вакуумной камеры установки, объектива и двух светоделителей.

3. Методика определения температуры

Для определения температуры поверхности нагретого вольфрама использовался подход, основанный на принципах пирометрии [2]. Главным преимуществом такого подхода является возможность определения температуры без непосредственного контакта детектора с исследуемым телом, что позволяет работать с экстремально сильно нагретыми материалами. Прежде чем перейти к рассмотрению способов определения температуры, стоит представить краткое описание теплового излучения металлов.

3.1. Излучение серых тел

Спектральная плотность мощности излучения с единицы поверхности абсолютно черного тела на единицу телесного угла наблюдения согласно закону Планка определяется как:

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

Где h – постоянная Планка, c – скорость света в вакууме, k – постоянная Больцмана, λ и T – длина волны излучения и температура тела соответственно. Для описания излучения серых тел, к которым относится вольфрам, вводится излучательная способность $\epsilon(\lambda, T)$ [3, стр. 51 - 65], показывающая отношение мощностей излучения серого и черного тел на одной и той же температуре и длине волны. То есть спектральная плотность мощности излучения вольфрама определяется как $R(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) \cdot R_0(\lambda, T)$. Зависимость полной мощности излучения нагретого вольфрама от температуры с телесного угла наблюдения Ω и площади S описывается интегралом:

$$P(T) = \int_S dS \int_{\Omega} d\Omega \int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda \cdot R(\lambda, T) \quad (2)$$

На рис. 4 представлен пример зависимости спектральной плотности мощности от длины волны при двух температурах для абсолютно черного

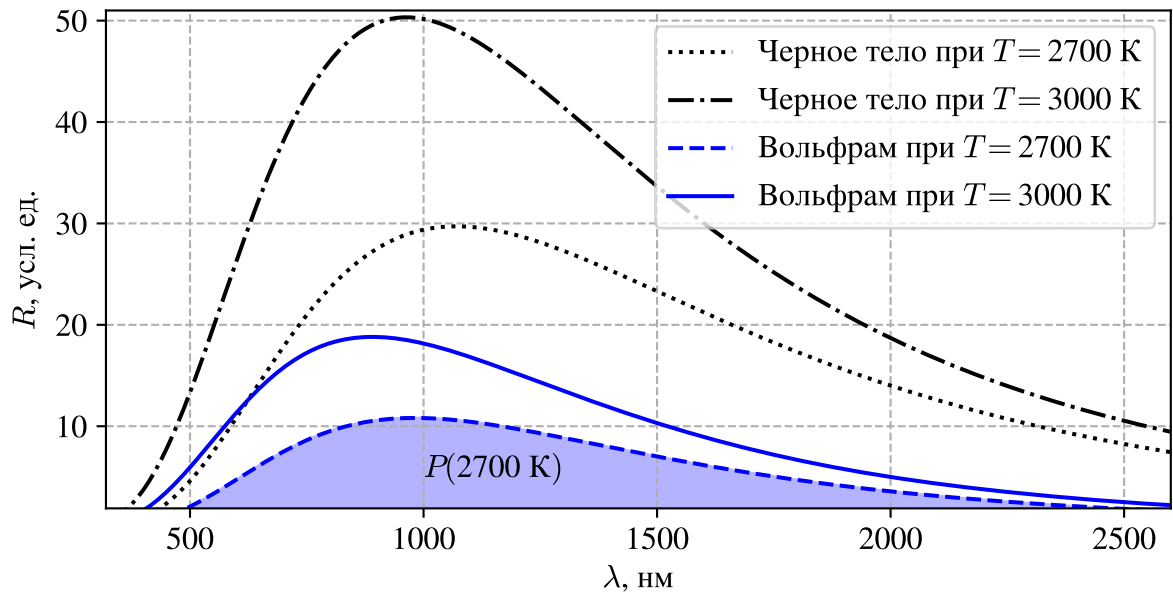


Рис. 4. Зависимость спектральной плотности мощности излучения от длины волны и температуры для абсолютно черного тела и вольфрама.

тела и вольфрама.

3.2. Излучательная способность вольфрама

В статье [4] была проведена интерполяция данных из работы [5] в диапазоне температур от 1600 К до 2800 К. Полученный полином имеет следующий вид:

$$\epsilon(\lambda, T) = a_0 + a_1(T - T_0) + [b_0 + b_1(T - T_0) + b_2(T - T_0)^2](\lambda - \lambda_0) + [c_0 + c_1(T - T_0)](\lambda - \lambda_0)^2 \quad (3)$$

Здесь $T_0 = 2200$ К, коэффициенты разложения a_i , b_i , c_i и сдвиг λ_0 зависят от длины волны λ , а их значения приведены в соответствующей таблице статьи [4]. Видно, что в разложении (3) содержится зависимость в основном только от первой степени температуры. Коэффициент b_2 имеет ненулевое значение только в диапазоне длин волн от 760 нм до 940 нм. Согласно графику на рис. 5, где отображена зависимость излучательной способности от длины волны для нескольких значений температур, кривая, соответствующая температуре 3400 К (что значительно выше максимального значения температуры, для которой проводилась интерполяция в работе [4]), в этом диапазоне длин волн не имеет существенных откло-

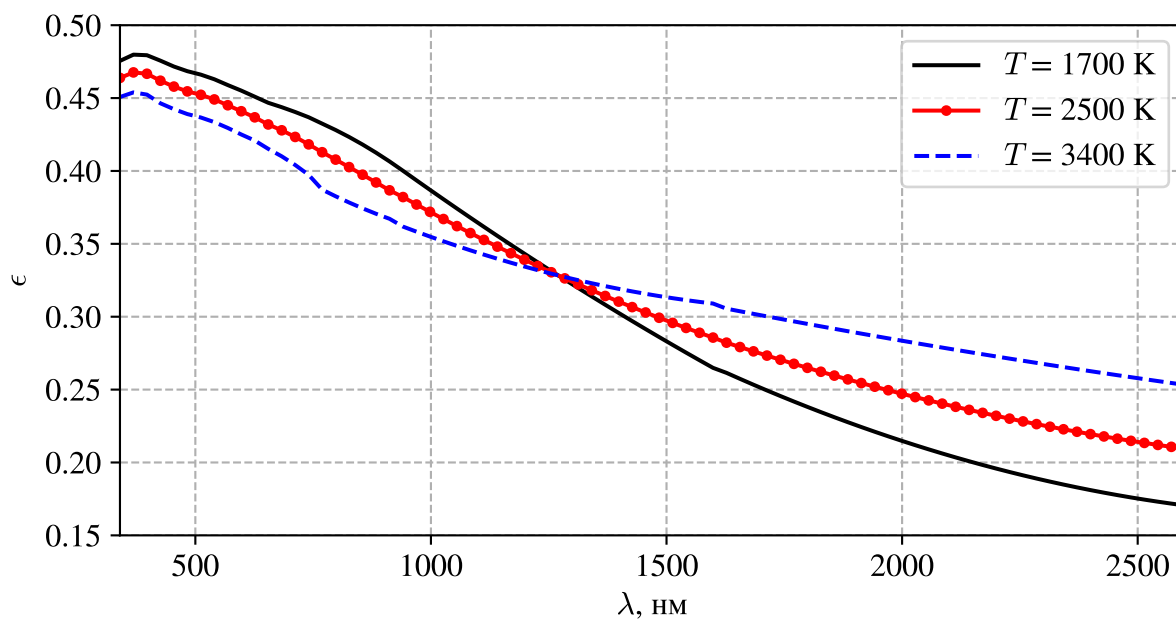


Рис. 5. Излучательная способность вольфрама в зависимости от длины волны.

нений от общего тренда.

При проведении экспериментов по определению температуры поверхности вольфрама, подвергающегося большой тепловой нагрузке, желательнее максимально точно теоретически вычислять мощность излучения вольфрама в наиболее широком диапазоне температур (по крайней мере до точки плавления – 3687 К). А значит, нужно точно знать зависимость излучательной способности от длины волны для этих температур. Линейный тренд зависимости излучательной способности от температуры (рис. 6) говорит о возможности использования полинома (3) для вычисления ϵ в несколько большем диапазоне температур, чем там, где проводилась интерполяция. В том, что излучательная способность действительно имеет линейную зависимость от температуры и при значениях больше 2800 К можно убедиться согласно данным, полученным в статье [6], где были проведены измерения для трех длин волн и температур от 3000 К до 4750 К. На рис. 6 также представлена зависимость излучательной способности от температуры для длины волны 780 нм, которая лежит в диапазоне длин волн, где коэффициент b_2 перед второй степенью температуры не равен нулю. Видно, что здесь нет существенного отклонения от линейной зависимости. Кроме того, далее будет выяснено, что камера SDU-285 в этом диапазоне длин волн имеет относительно слабую чувствительность к излучению, что нивелирует влияние неточности

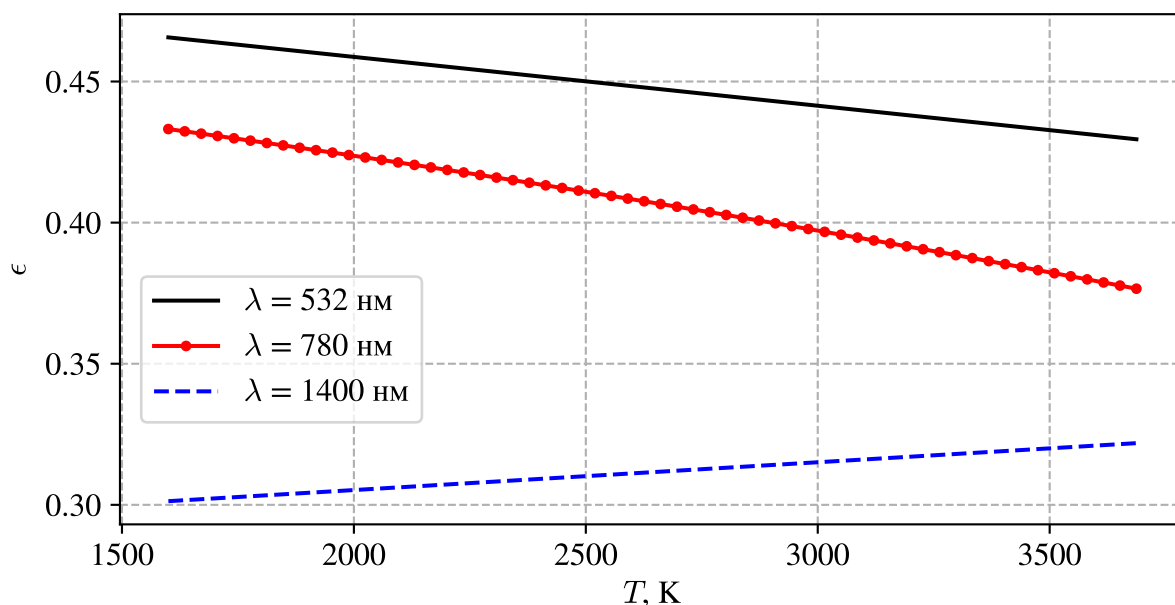


Рис. 6. Излучательная способность вольфрама в зависимости от температуры.

в излучательной способности на определение температуры. Отсюда можно сделать вывод, что полином (3) вполне допустимо использовать для расчетов температур по крайней мере вплоть до температуры плавления вольфрама (3687 К). Ошибка, получаемая вследствие отклонения из-за зависимости от второй степени температуры, дает максимальное отклонение при вычислении мощности около 0.05%.

Необходимо отметить, что излучательная способность любого металла зависит не только от длины волны и температуры, но и от степени шероховатости поверхности [3, стр. 120 - 125]. В первом приближении эту зависимость можно отразить через коэффициент пропорциональности k , показывающий степень шероховатости: $\epsilon(\lambda, T) = k \cdot \epsilon_s(\lambda, T)$, где ϵ_s – излучательная способность полированного вольфрама.

3.3. Методика расчета температуры

Исходя из вышеописанного, можно сформулировать два способа определения температуры нагретого вольфрама. Первый заключается в измерении абсолютного значения мощности излучения металла. Все детекторы, регистрирующие излучение, обладают общей характеристикой – спектральной чувствительностью $r(\lambda)$, показывающей долю излучения, фиксируемую прибором, в зависимости от длины волны. Сигнал, измеряемый прибором, согласно (2) теоретически определяется следующим

образом:

$$I(T) = \int_S dS \int_{\Omega} d\Omega \int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda \cdot r(\lambda) R(\lambda, T) \quad (4)$$

То есть, сравнивая измеряемую прибором величину (размерность которой зависит от r) с теоретически рассчитанной по формуле (4) зависимостью, можно получить температуру объекта, излучение $I(T)$ которого фиксировалось прибором. Другими словами, суть вычисления температуры заключается в нахождении обратной функции I^{-1} .

Однако прежде упоминалось, что излучательная способность, а соответственно мощность излучения металла, имеет зависимость от шероховатости поверхности. В экспериментах по изучению влияния экстремальных нагрузок на вольфрам его поверхность непременно будет меняться, что окажет существенное влияние на точность в определении температуры. Чтобы минимизировать эту ошибку, можно использовать второй метод, заключающийся в определении температуры по отношению мощностей излучения $B(T) = I_1(T)/I_2(T)$, зафиксированных с помощью двух детекторов с разной спектральной чувствительностью – так называемая двухцветная пирометрия:

$$B(T) = \frac{\int_S dS \int_{\Omega} d\Omega \int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda \cdot r_1(\lambda) R(\lambda, T)}{\int_S dS \int_{\Omega} d\Omega \int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda \cdot r_2(\lambda) R(\lambda, T)} \quad (5)$$

Действительно, в первом приближении, когда излучательная способность имеет следующий вид: $\epsilon(\lambda, T) = k \cdot \epsilon_s(\lambda, T)$, то есть спектральная плотность мощности излучения вольфрама задается уравнением $R(\lambda, T) = k \cdot \epsilon_s(\lambda, T) \cdot R_0(\lambda, T)$, согласно соотношению (5) такой способ позволяет полностью избавиться от влияния шероховатости. Определение температуры, опять же, заключается в нахождении обратной функции B^{-1} .

Более наглядно этот способ определения температуры проиллюстрирован на рис. 7, где представлена зависимость спектральной плотности мощности вольфрама $R(\lambda, T)$ для одного значения температуры и величин, регистрируемых детекторами с модельными чувствительностями $r_1(\lambda)$ и $r_2(\lambda)$, от длины волны. Согласно закону Вина, при повышении

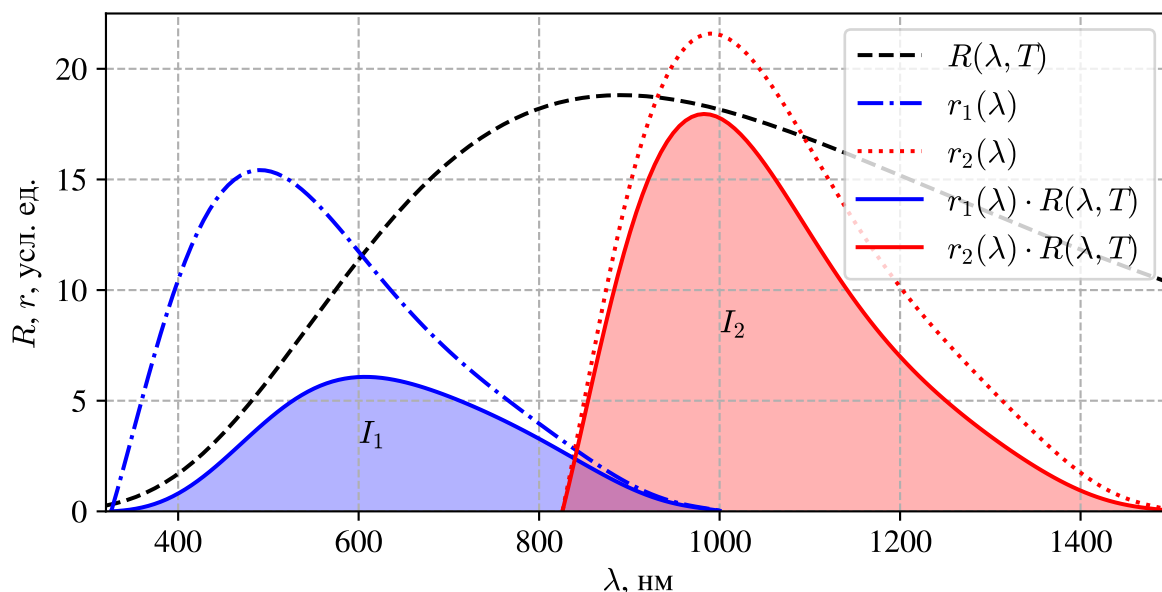


Рис. 7. Зависимость спектральной плотности мощности излучения вольфрама от длины волны с иллюстрацией метода двухцветной пирометрии.

температуры длина волны, соответствующая максимуму $R(\lambda, T)$, будет сдвигаться обратно пропорционально температуре $\lambda_{max} = b/T$ (да и само значение максимума будет расти). Поэтому доля излучения при изменении температуры будет перераспределяться между интегралами I_1 и I_2 , что будет менять их соотношение. Для максимально высокой точности определения температуры таким методом требуется достаточно большая разница между спектральными диапазонами чувствительности детекторов и минимальная погрешность при регистрации мощности излучения.

Нахождение $I^{-1}(T)$ (или $B^{-1}(T)$) можно осуществлять путем интерполяции зависимостей $I(T)$ (или $B(T)$) кривыми вида $T(X) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot X^{b_i}$, где $X = I(T)$ (или $B(T)$), а a_i и b_i вычисляются методом наименьших квадратов. Таким образом, для определения температуры исследуемого вольфрама нужно подставить измеренную мощность излучения I_i или отношение B_i в интерполяционную кривую $T(X)$. Такой способ является очень удобным, но не самым точным. Максимальной точности можно добиться идеологически более простым путем: сравнивая полученные практически значения X_i (где X_i это либо I_i , либо B_i) с рассчитанными согласно формуле (4) (или (5)) значениями X_j с точностью δ . А в случае выполнения условия $|X_i - X_j| / (|X_i| + |X_j|) < \delta$, ставить в соответствие величине X_i температуру T_j .

4. Калибровка и настройка средств диагностики

Один из путей калибровки и настройки измерительного оборудования подразумевает использование прибора с известной зависимостью мощности излучения нагреваемого материала от его температуры [7]. В качестве такого прибора была выбрана специальная вольфрамовая ленточная лампа СИ-10-300 с известной зависимостью температуры ленты от мощности ее питания. В силу того, что лампа была произведена достаточно давно, и появилась вероятность изменения ее характеристик из-за деградации излучателя и истекания газа из колбы, возникла необходимость по проведению работ для определения зависимости температуры ленты от мощности питания лампы.

Калибровка камер заключалась в получении закона преобразования мощности освещения матрицы в уровень сигнала G , фиксируемый камерами. Также, чтобы использовать камеры SDU-285 для проведения каких-либо количественных измерений, было необходимо проверить основные характеристики камеры: линейность преобразования мощности освещения матрицы в фиксируемый уровень сигнала, линейность относительно изменения времени экспозиции и коэффициента усиления, а также зависимость спектральной чувствительности ПЗС-матрицы от длины волны. В случае выполнения линейности закона преобразования мощности регистрируемого камерой излучения, уровень сигнала G согласно равенству (4) определяется так:

$$G(T) = \int_{\Omega} d\Omega \int_S dS \int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda \cdot r_w(\lambda) R(\lambda, T) \quad (6)$$

Однако паспортная чувствительность матрицы r определена в относительных единицах, то есть $r_w = a \cdot r$, $a = const$. Тогда уравнение (6) можно записать следующим образом:

$$G(T) = A \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda \cdot r(\lambda) R(\lambda, T) \quad (7)$$

Интегралы по площади и телесному углу, зависящие исключительно от геометрии, можно записать в константу A , так как калибровку предполагалось провести на экспериментальной установке. Таким образом, суть калибровки сводилась к нахождению значения коэффициента A .

Вообще говоря, кривая зависимости уровня сигнала, регистрируемого камерой, от температуры вольфрамовой ленты лампы позволит проводить измерения, но для температур до 2400 К (температура, соответствующая максимальному ограничению мощности питания лампы). В этом случае нет необходимости в знании спектральных характеристик прибора. А вот известный коэффициент A дал бы возможность определять в соответствии с уравнением (7) температуры в диапазоне, где известна излучательная способность вольфрама – более широком, чем способна дать калибровка.

Для калибровки системы лавинных фотодиодов было достаточно получить кривую зависимости напряжения, регистрируемого АЦП, от температуры ленты лампы. Это связано с тем, что излучение к ним подводится с помощью световодов, детальное влияние которых на спектральную чувствительность приборов неизвестно.

4.1. Калибровка ленточной лампы СИ-10-300

Оптическая схема стенда представлена на рис. 8. Диафрагма здесь нужна для недопущения избыточного освещения детектора, а прерыватель – для модуляции излучения от лампы с целью отличить его от окружающего освещения. В качестве детекторов излучения использовались калиброванные фотодиоды FDS100 и FD21, имеющие разные спектральные диапазоны чувствительности (рис. 9). Для каждого фотодиода снималась зависимость фототока I_i от мощности питания лампы P_i . Для удобства дальнейших вычислений учет влияния изменения размеров диафрагмы велся сразу, то есть,

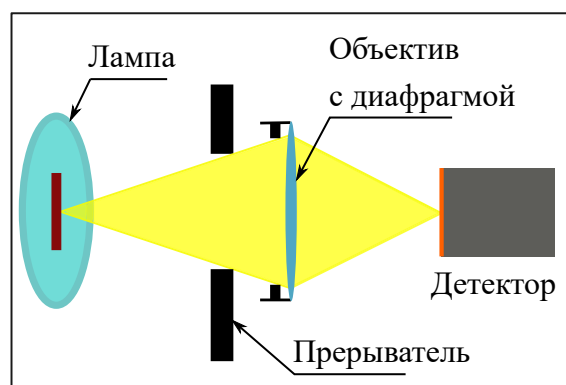


Рис. 8. Схема стенда для калибровки лампы.

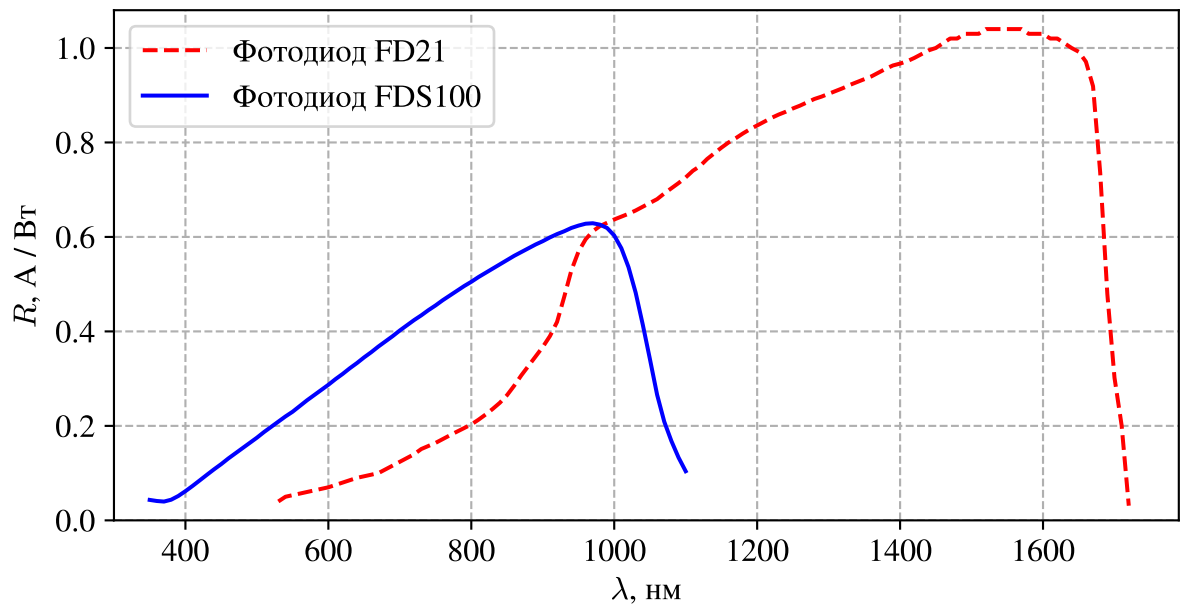


Рис. 9. Спектральная чувствительность фотодиодов.

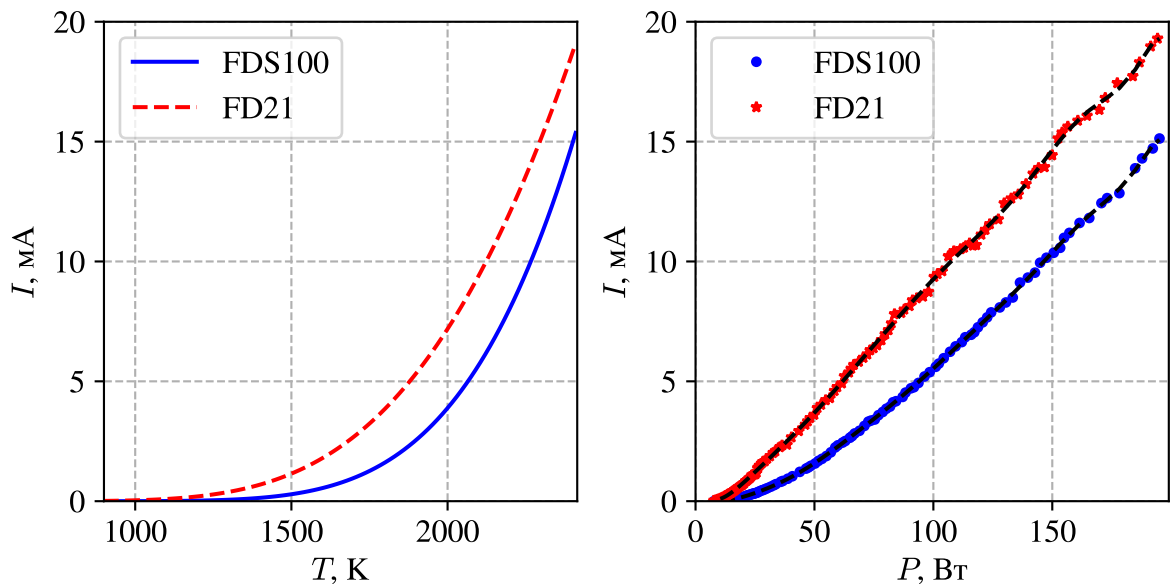


Рис. 10. Зависимость фототока от температуры вольфрамовой ленты лампы, рассчитанная теоретически (слева) и практически полученная зависимость фототока от мощности питания лампы (справа), пунктиром выделен результат интерполяции.

при уменьшении площади ее отверстия в m раз, фототок умножался на m .

Определенные согласно интегралу (4) теоретические значения фототока I_j в зависимости от температуры T_j (рис. 10, слева) для обоих детекторов сравнивались с практически полученными значениями фототоков I_i (рис. 10, справа) с точностью $\delta = 10^{-4}$, то есть относительной ошибкой в 0.01%. При выполнении условия $|I_i - I_j|/(|I_i| + |I_j|) < \delta$ в

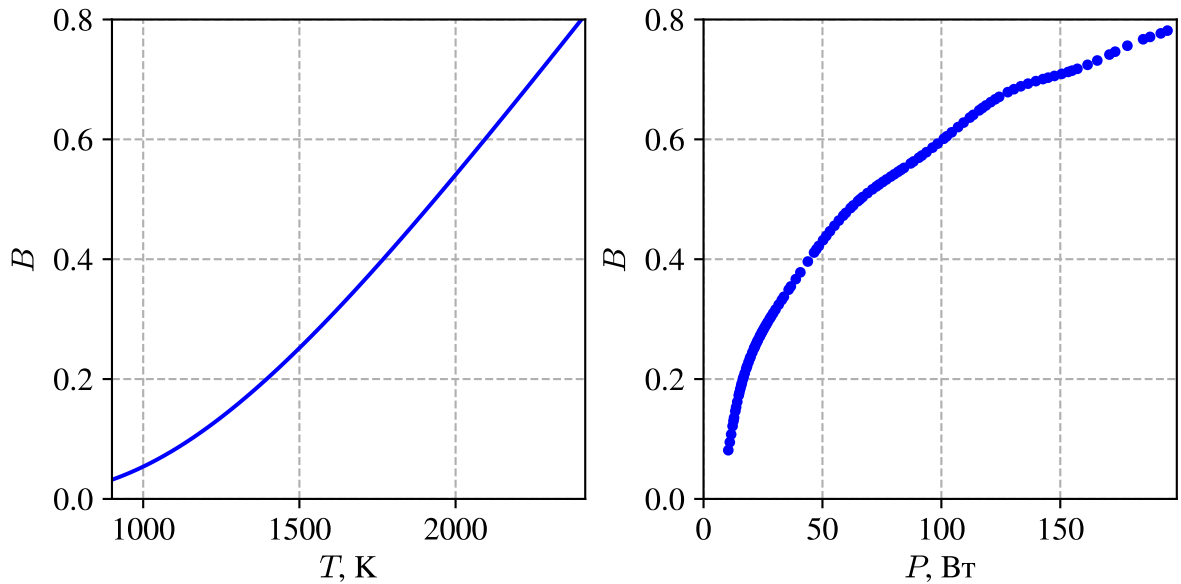


Рис. 11. Зависимость отношения фототоков $B = I(\text{FDS100})/I(\text{FD21})$ от температуры вольфрамовой ленты лампы, рассчитанная теоретически (слева), и практически полученная зависимость B от мощности питания лампы (справа).

соответствие мощности питания лампы P_i ставилась температура T_j . Поскольку измерения проводились с использованием фотодиодов, имеющих разную спектральную чувствительность, была возможность определения температуры по отношению измеренных фототоков $B_i(T)$. Теоретически рассчитываемая согласно формуле (5) зависимость B_j от T_j (рис. 11, слева), опять же, сравнивалась с зависимостью, определенной практически (рис. 11, справа), с точностью $\delta = 10^{-4}$, и находилась кривая $T(P)$. Чтобы находить практически получаемые отношения $B_i = I_i(\text{FDS100})/I_i(\text{FD21})$, пришлось провести интерполяцию зависимостей I_i от P_i для каждого из фотодиодов с выбором новой сетки мощностей P_k , так как при проведении измерений невозможно было выставить абсолютно одинаковые мощности питания лампы для каждого из детекторов. Интерполяция проводилась с использованием полинома 12 степени p_1 – для фотодиода FDS100 и p_2 – для фотодиода FD21, тогда отношения вычислялись согласно равенству $B_k = p_1(P_k)/p_2(P_k)$. Результат интерполяции представлен на рис. 10 (справа, пунктирной линией). Выбор такой большой степени объясняется быстрым изменением скорости возрастания кривой вблизи малых значений токов. Ошибка при интерполяции не превышает по абсолютному значению тока 0.3 мА для фотодиода FD21 (3%) и 0.15 мА для фотодиода FDS100 (2%). Дополнительно проводились измерения с использованием

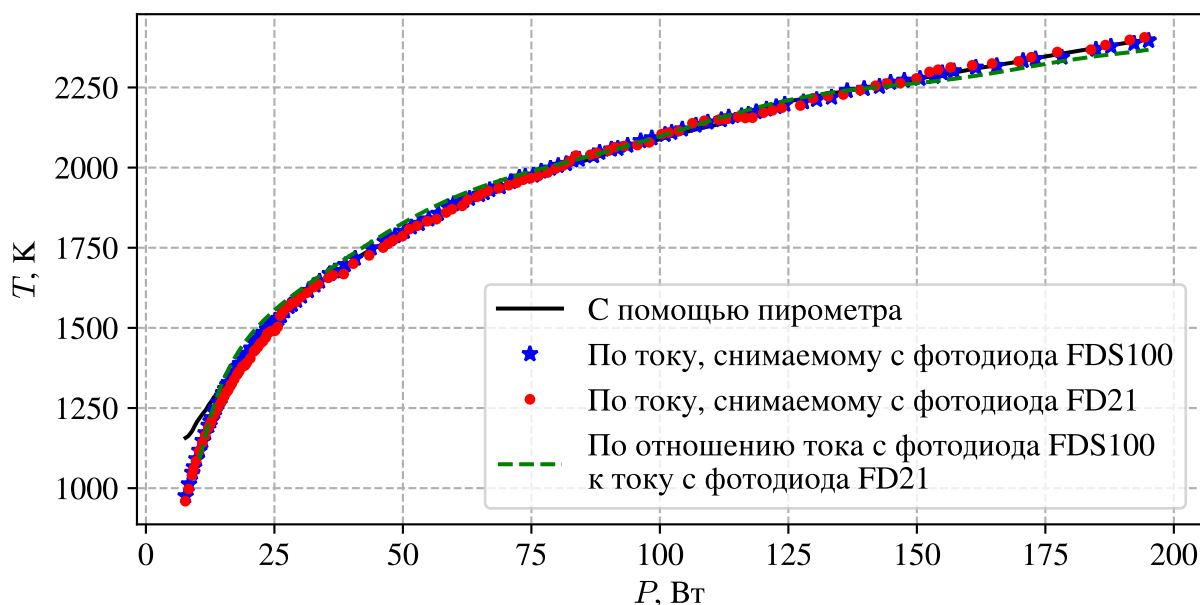


Рис. 12. Зависимость температуры вольфрамовой ленты от мощности питания лампы.

инфракрасного пирометра, откалиброванного для определения температуры вольфрама в диапазоне от 1070 К до 3270 К. Полученные зависимости представлены на рис. 12.

Погрешность в определении температуры по абсолютным значениям токов составляет не более 80 К для фотодиода FDS100 и 90 К для FD21, по отношениям токов - не более 110 К. Отличие связано с разными динамическими диапазонами значений фототоков относительно падающей на рабочую поверхность фотодиодов интенсивности света. Важно отметить, что такая погрешность вполне допустима, поскольку в интересующем диапазоне температур (более 1300 К), относительная погрешность составляет менее 5%, так как с помощью изменения размеров диафрагмы подбирались такие диапазоны значений фототоков, чтобы влияние шумов было минимально.

Для определения температуры вольфрамовой ленты лампы по значениям мощности ее питания, была проведена интерполяция зависимости $T(P)$ (рис. 13), полученной путем усреднения температур, измеренных разными способами в ходе калибровки лампы. Интерполяция проводилась с помощью кривой вида:

$$T = a \cdot P^b + c \quad (8)$$

Где коэффициенты a , b , c находились методом наименьших квадратов.

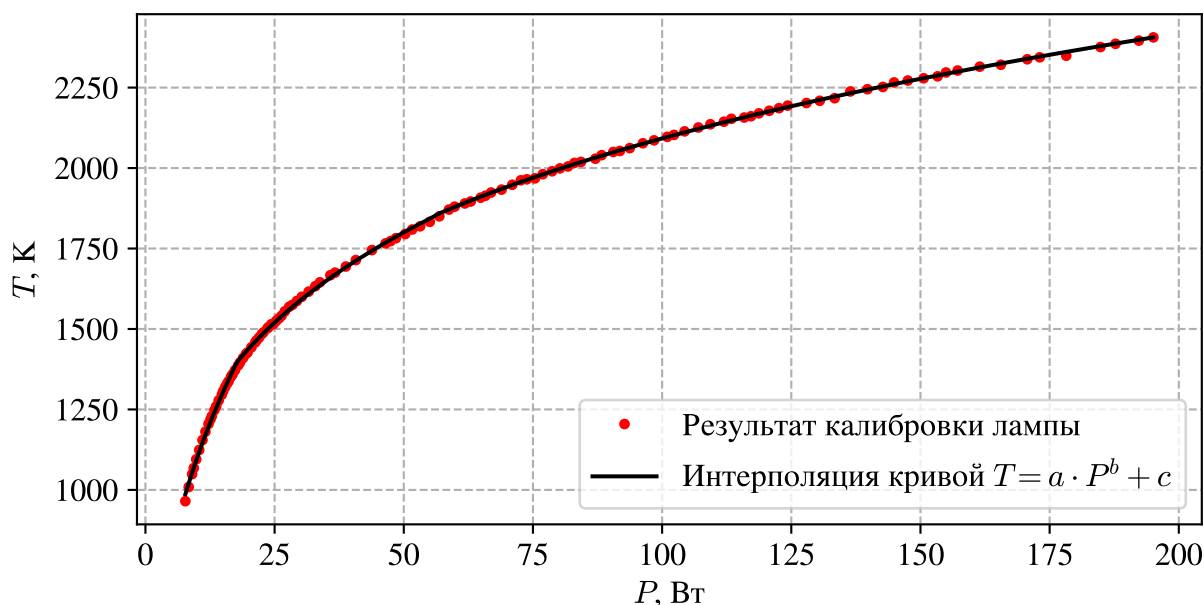


Рис. 13. Зависимость температуры ленты лампы от мощности ее питания, используемая в определении температуры для проведения калибровки системы диагностики.

Для минимизации ошибки массив мощностей P_i делился на 3 части. Максимальное отклонение между интерполяционной кривой и точками, определенными практически, составило 20 К, а в наиболее интересном диапазоне температур (выше 1300 К) – менее 10 К. Значения коэффициентов a , b , c и зависимость относительной ошибки от мощности при интерполяции содержатся в таблице 1 и на рис. 25 приложения соответственно.

4.2. Проверка характеристик камер

Стоит отметить, что при работе с камерами на основе ПЗС-матриц имеет место быть эффект блюминга – процесс растекания заряда из потенциальных ям матриц, проявляющийся при их постоянной засветке и оказывающий существенное влияние на точность измерений. Поэтому, чтобы получать максимально достоверные данные, необходимо было предпринимать действия для борьбы с этим эффектом. Существует два способа минимизации влияния эффекта блюминга: увеличение времени экспозиции, либо использование дополнительного быстрого затвора при съемке. Для проверки чувствительности матрицы и линейности преобразования мощности освещения в уровни сигнала вполне допустимо было использовать первый метод, ослабляя излучение от источника

с помощью диафрагм или оптических фильтров. В работе по проверке линейности относительно изменения времени экспозиции или коэффициента усиления, интерес представлял диапазон маленьких времен экспозиции, поскольку при таких условиях проводятся эксперименты (в условиях эксперимента эффект блюминга не проявляется в силу малой длительности изучаемого события – несколько сотен микросекунд). Поэтому в этом случае использовался подход с применением быстрого затвора, роль которого выполнял прерыватель с системой синхронизации.

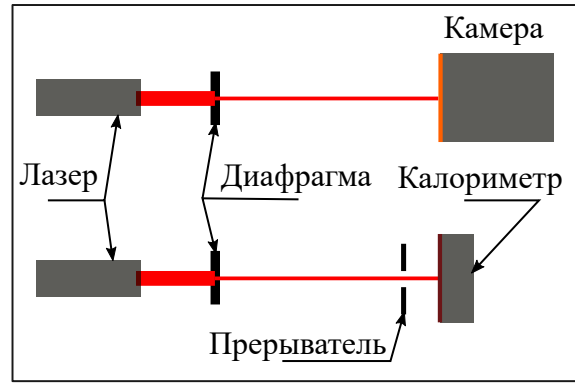


Рис. 14. Схема стенда для проверки чувствительности.

Перед работой по калибровке камер в первую очередь была проведена проверка зависимости спектральной чувствительности ПЗС-матрицы SONY ICX285, используемой в камере SDU-285, от длины волны. Оптическая схема стенда представлена на рис. 14. Диафрагма здесь нужна для недопущения излишнего освещения матрицы, прерыватель – для того, чтобы при измерении мощности излучения калориметром, свет от лазера можно было отличить от окружающего освещения. В качестве источников монохроматического излучения были использованы три лазера, излучающие на длинах волн 532 нм, 660 нм и 980 нм. Это позволило определить значения спектральной чувствительности для трех длин волн и сопоставить три точки с паспортной кривой.

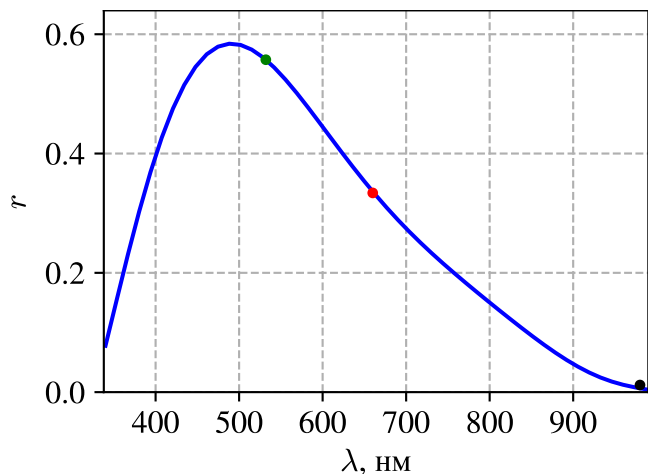


Рис. 15. Спектральная чувствительность ПЗС-матрицы с точками, полученными в результате ее проверки.

Величину сигнала, регистрируемого камерой с чувствительностью $r(\lambda)$ излучения лазера с длиной волны λ_i ,

можно записать как $G_i = \int_S r(\lambda_i) p_i dS / S$, где p_i - плотность мощности лазерного луча с поперечным сечением S . Тогда значение спектральной чувствительности будет вычисляться как $r(\lambda_i) = G_i \cdot S / \int_S p_i dS$, где величина $\int_S p_i dS$ регистрируется калориметром. Таким образом было получено три значения спектральной чувствительности ПЗС-матрицы, соответствующих длинам волн излучения используемых для проверки лазеров. После эти значения были приведены к размерности паспортной кривой в относительных единицах и отмечены на рис. 15. Отличия от паспортных значений составляют 0.0024 и 0.0055 для длин волн 660 нм и 980 нм соответственно (по первому значению длины волны проводилась привязка к размерности паспортной кривой).

Проверка линейности преобразования мощности освещения матрицы в уровень сигнала, регистрируемый камерой, производилась по очень простой схеме. Матрица освещалась откалиброванной ранее лампой, и снималось несколько фотографий ленты лампы с разной мощностью ее питания. После находились в соответствии с уравнением (4) отношения мощностей излучения ленты $I_0(T)/I(T)$, где температура получалась исходя из результатов калибровки, и строилась зависимость этой величины от мощности питания лампы. Здесь I_0 - наибольшее значение мощности излучения, соответствующее мощности питания лампы $P = 31.59$ Вт. По полученным снимкам определялся уровень сигнала G , соответствующий мощности излучения I .

В случае выполнения линейного закона $G = A \cdot I$, очевидно соотношение $G_0/G = I_0/I$. На рис. 16 представлена зависимость I_0/I (или G_0/G для камеры) от мощности питания лампы, откуда видно хорошее совпадение отношений мощностей излучения, зарегистрированных каме-

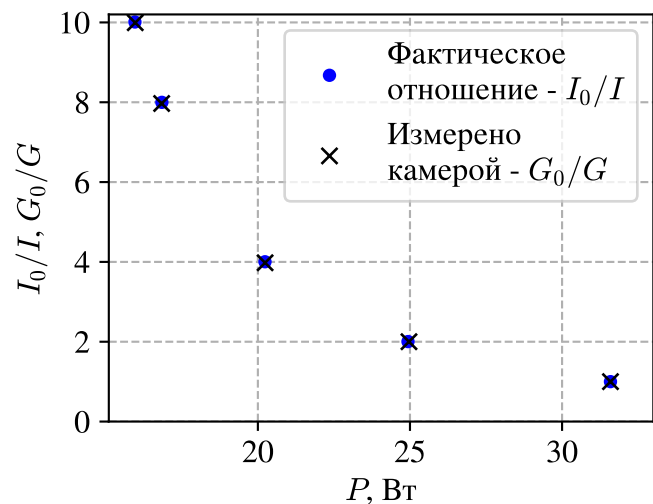


Рис. 16. Результат проверки линейности преобразования мощности освещения ПЗС-матрицы в уровень сигнала, регистрируемый камерой.

рой, и их фактических значений, что говорит о выполнении линейного закона преобразования $G = A \cdot I$.

Проверка линейности изменения сигнала G , фиксируемого камерой, относительно изменения времени экспозиции и усиления проводилась по схеме, аналогичной вышеописанной, в которую добавлялся прерыватель с системой синхронизации для борьбы с эффектом блюминга. Матрица освещалась лампой и снимались фотографии ее ленты либо при фиксированном усилении, но разными временами экспозиции, либо с фиксированным временем экспозиции, но различными значениями коэффициента усиления. Полученный при этом уровень сигнала в зависимости от времени экспозиции t и коэффициента усиления k представлен на рис. 17. Видно хорошее выполнение линейного закона везде, за исключением точек с наибольшим временем экспозиции или значением коэффициента усиления, где высокой точности измерения и не ожидается.

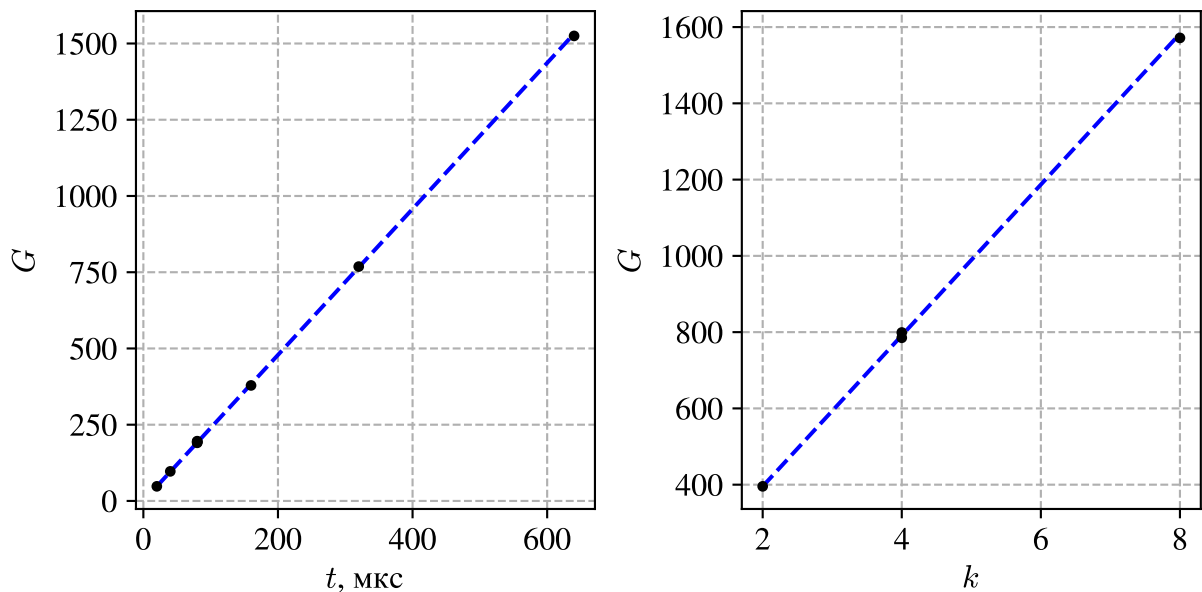


Рис. 17. Проверка линейности изменения уровня сигнала G относительно изменения времени экспозиции t (слева) и коэффициента усиления k (справа).

Резюмируя полученные результаты, можно сказать, что камеру SDU-285 допустимо использовать в качестве измерительного прибора в широком диапазоне значений измеряемой мощности излучения. Выполнение линейности преобразования мощности освещения матрицы в уровень сигнала, регистрируемый камерой, позволяет использовать уравнение (7) для проведения расчетов в большом диапазоне температур. Кроме того,

стоит добавить, что результат проверки чувствительности ПЗС-матриц уже можно использовать для расчета температур, поскольку он позволяет определить чувствительность r_w в размерных единицах (уровень сигнала, измеряемый камерой, на мощность в ваттах), зависимость которой от длины волны представлена на рис. 18. То есть, в данном случае отпадает необходимость в знании коэффициента A преобразования (7). Однако теоретический расчет согласно (6) требует учета геометрии, то есть телесного угла наблюдения Ω и площади участка S на поверхности исследуемого вольфрама, соответствующий размеру пикселя (6.45×6.45 мкм).

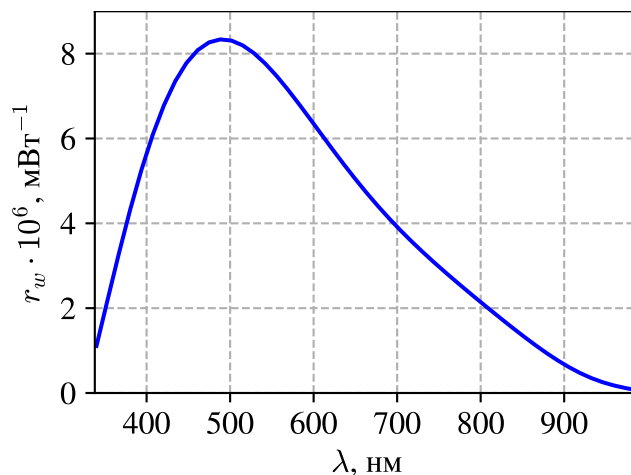


Рис. 18. Спектральная чувствительность ПЗС-матрицы в размерных единицах.

4.3. Калибровка системы диагностики

Калибровка системы диагностики проводилась непосредственно на установке ВЕТА. Оптическая схема системы диагностики, подготовленной для проведения калибровки, изображена на рис. 19. Вместо вольфрамовой мишени в вакуумную камеру установки помещалась лампа СИ-10-300. Также сюда был добавлен прерыватель с системой синхронизации, выполняющий роль быстрого затвора для борьбы с эффектом блуминга, а в случае с лавинными фотодиодами он необходим для модуляции сигнала. Работа по калибровке камер заключалась в регистрации изображений вольфрамовой ленты лампы при разных мощностях ее питания с разными оптическими фильтрами. Снимки обрабатывались, и строилась зависимость измеряемого камерой уровня сигнала G от температуры вольфрамовой ленты лампы T , которая определялась согласно интерполяционной кривой (8). Это было сделано для двух фильтров – ОС-13 и КС-19, влияние которых на спектральную чувствительность матрицы отражено на рис. 20 (слева). Оптические фильтры необходимы для из-

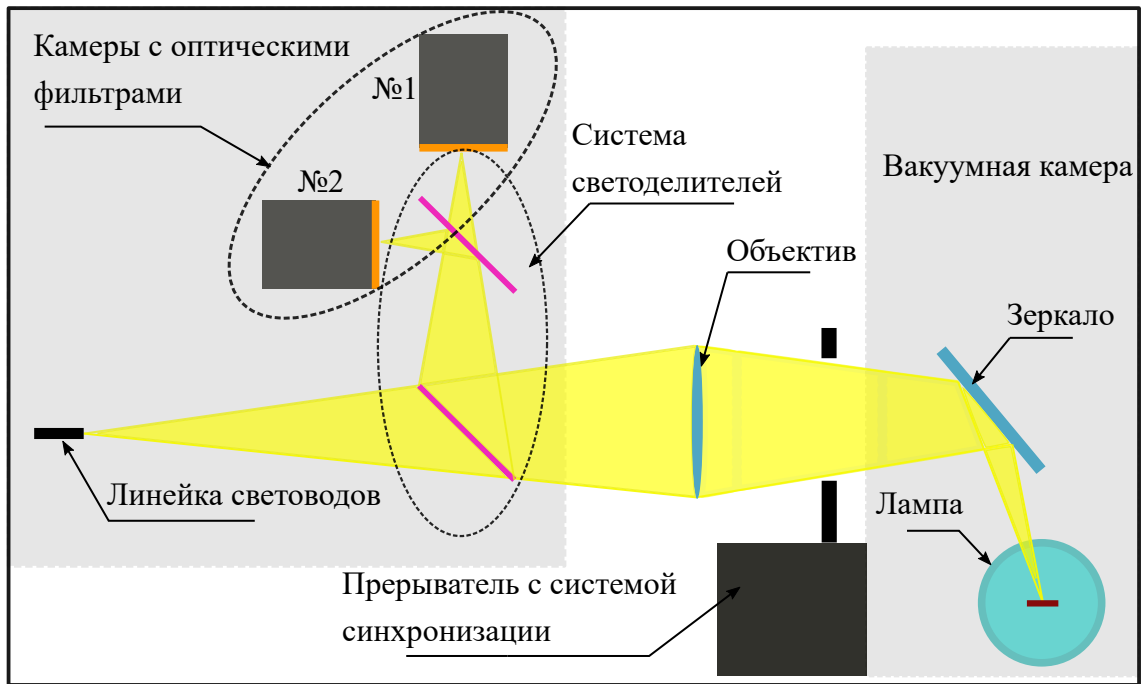


Рис. 19. Оптическая схема системы диагностики (калибровка).

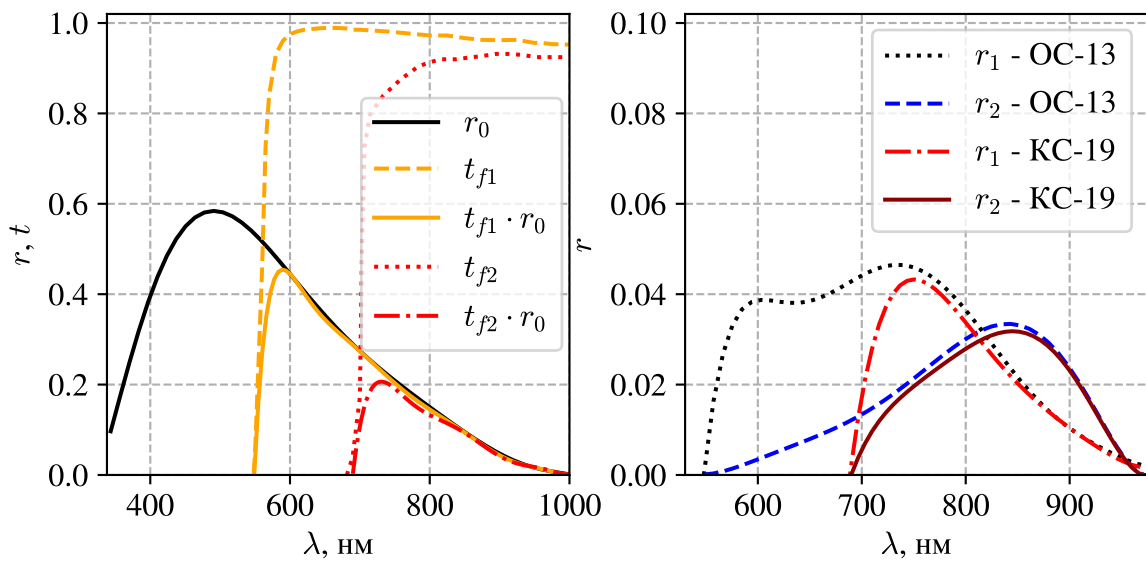


Рис. 20. Зависимость спектральной чувствительности ПЗС-матрицы камеры SDU-285 с учетом влияния фильтров ОС-13 и КС-19 с пропусканием t от длины волны (слева) и с учетом влияния фильтров и светоделителей (справа).

менения спектральной чувствительности камер, чтобы реализовать метод двухцветной пирометрии.

Для достижения основной цели по поиску коэффициента A преобразования (7) необходимо знать влияние спектральных характеристик оптических фильтров и светоделителей на чувствительность камер $r(\lambda)$. Согласно оптической схеме на рис. 19 чувствительность матриц будет опре-

деляться по формулам $r_1^{1,2} = r_s \cdot t_s \cdot t_{1,2} \cdot r_0$ и $r_2^{1,2} = r_s \cdot r_s \cdot t_{1,2} \cdot r_0$, где нижний индекс r соответствует номерам камер 1 и 2, верхний – номеру фильтра (1 – ОС-13, 2 – КС-19). Здесь r_s и t_s – отражательная и пропускная способность светоделителей соответственно, $t_{1,2}$ – пропускная способность фильтров, r_0 – исходная спектральная чувствительность матрицы. На рис. 20 (справа) представлены зависимости спектральных чувствительностей матриц, соответствующих двум камерам, от длины волны для двух вышеупомянутых оптических фильтров.

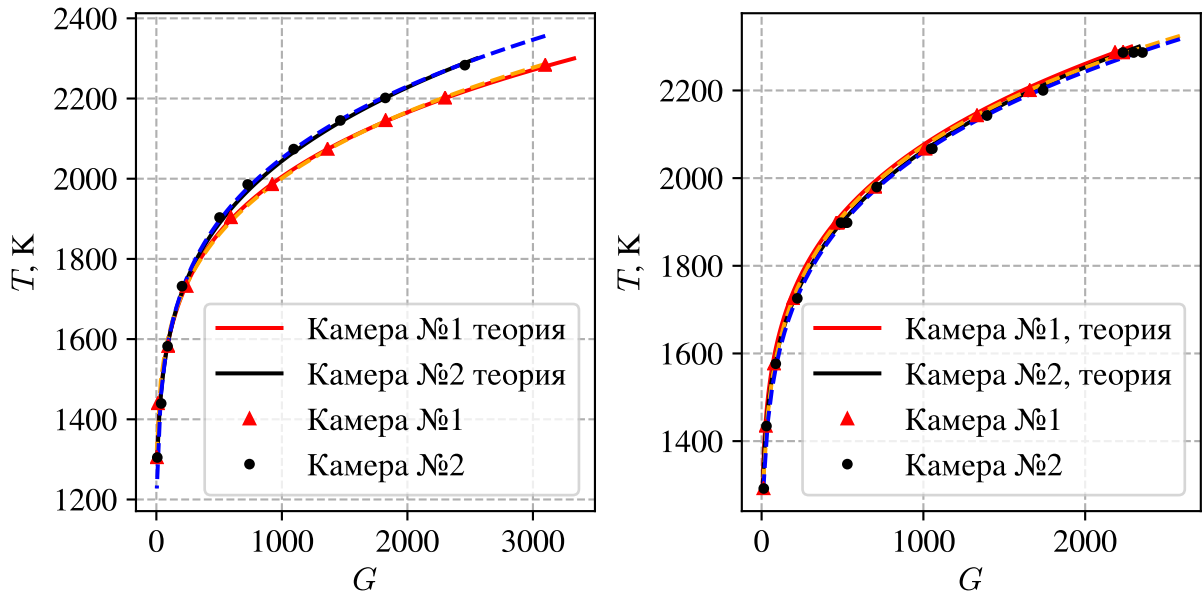


Рис. 21. Зависимость температуры вольфрамовой ленты от уровня сигнала для обеих камер с фильтрами ОС-13 (слева) и КС-19 (справа), пунктирной линией выделена интерполяция кривой вида $T = a \cdot G^b + c$.

Результат калибровки представлен на рис. 21, где отображена зависимость температуры вольфрамовой ленты лампы T от уровня сигнала G , регистрируемого камерами. Методом наименьших квадратов была проведена интерполяция полученных данных кривой вида $T = a \cdot G^b + c$ (отмечена пунктиром). Эта кривая может быть использована для определения температуры по снимкам, сделанным при тех же условиях, что проводилась калибровка (время экспозиции 20 мкс и коэффициент усиления 2). Также для двух вариантов фильтров был найден коэффициент преобразования A , который согласно (7) определяется следующим образом:

$$A_{1,2}^{1,2} = G_{1,2}^{1,2}(T) / \int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda \cdot r_{1,2}^{1,2} R(\lambda, T) \quad (9)$$

Где нижний индекс соответствует номеру камеры, а верхний – номеру фильтра (1 – ОС-13, 2 – КС-19). В соответствии с формулой (9) были найдены следующие значения: $A_1^1 = 11.91$, $A_2^1 = 12.11$, $A_1^2 = 12.35$, $A_2^2 = 12.63$. Максимальное отличие составляет порядка 5%, что говорит о возможности использования результата калибровки для любых комбинаций фильтров, а теоретическую зависимость уровня сигнала G от температуры вычислять согласно (7). Это позволит определять температуры, по крайней мере, вплоть до точки плавления вольфрама (где максимально точно известна его излучательная способность) при любых параметрах камеры, учет которых производится следующим образом:

$$A_n = A_s \cdot \frac{t_s}{t_n} \cdot \frac{k_s}{k_n} \quad (10)$$

Где A_s – коэффициент, определенный в результате этой калибровки, $t_s = 20$ мкс и $k_s = 2$ – значения времени экспозиции и коэффициента усиления, применяющиеся при проведении калибровки.

На рис. 22 представлен результат работы по калибровке лавинных фотодиодов – зависимость температуры вольфрамовой ленты лампы от сигнала, снимаемого АЦП, с интерполяцией кривой вида $T = a \cdot v^b + c$, которую можно использовать для измерений в диапазоне температур от 1200 К до 2250 К.

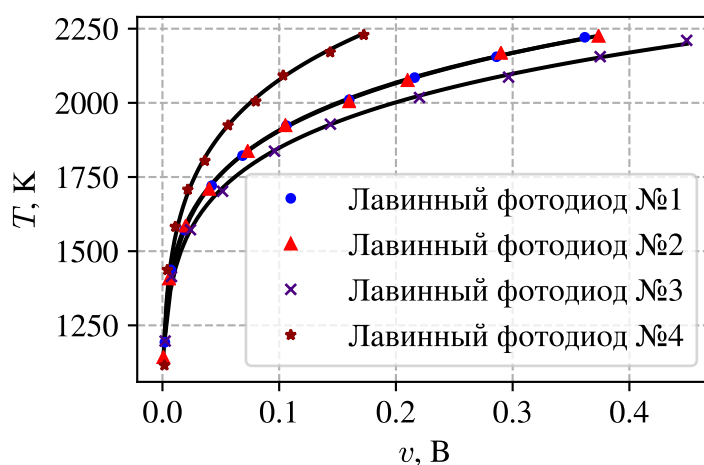


Рис. 22. Зависимость напряжения, снимаемого с лавинных фотодиодов в зависимости от температуры вольфрамовой ленты лампы, сплошной линией выделена интерполяция кривой вида $T = a \cdot v^b + c$.

Значения коэффициентов, полученных методом наименьших квадратов при интерполяции калибровочных кривых, представлены в таблице 2 приложения. Серийные номера откалиброванных приборов содержатся в таблице 3 приложения.

5. Анализ результатов

Для определения температуры поверхности вольфрама по снимкам, сделанным с помощью камер с разными фильтрами, была проведена интерполяция методом наименьших квадратов зависимостей $T(P)$, полученных согласно формуле (7), кривой вида:

$$T = a \cdot G^b + c \cdot G^{\frac{1}{6}} + d \quad (11)$$

Результат, представленный на рис. 23 (слева), позволяет определять температуру в диапазоне от 1000 К до 3687 К по абсолютным значениям измеряемого камерой уровня сигнала. Для того, чтобы реализовать ме-

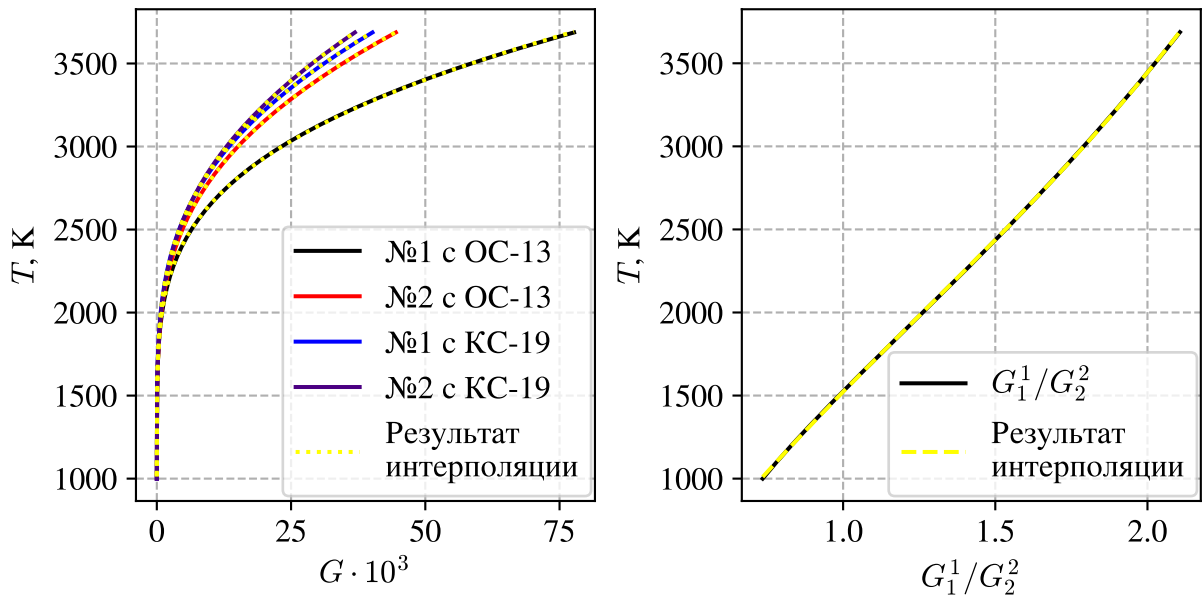


Рис. 23. Теоретически посчитанная зависимость температуры поверхности вольфрама от уровня сигнала для обеих камер с фильтрами ОС-13 и КС-19 с интерполяцией кривой вида $T = a \cdot G^b + c \cdot G^{\frac{1}{6}} + d$ (слева); и зависимость отношения уровней сигнала для камеры №1 с фильтром ОС-13 и камеры №2 с фильтром КС-19 с интерполяцией полиномом третьей степени $T = \sum_{i=0}^3 a_i \cdot (G_1^1/G_2^2)^i$ (справа).

тод определения температуры по отношению сигналов, очевидно выбрать следующее сочетание: камера №1 с фильтром ОС-13 и камера №2 с фильтром КС-19. Это позволит уменьшить влияние ошибки в регистрации излучения на точность определения температуры в силу наибольшей разницы между значениями мощностей, получаемых в такой конфигурации согласно рис. 23 (слева). Вычисленная в соответствии с формулами (5)

и (7) зависимость $G_1^1(T)/G_2^2(T)$ интерполировалось полиномом третьей степени $T = \sum_{i=0}^3 a_i \cdot (G_1^1/G_2^2)^i$ (рис. 23, справа). Абсолютно аналогичный результат даст расчет согласно уравнению (6) с размерной чувствительностью r_w . Значения коэффициентов разложения и относительная ошибка, полученная при интерполяции, содержатся в таблице 4 и на рис. 26 приложения соответственно.

Судя по вычисленным значениям уровней сигнала G , чтобы измерять большие температуры, придется ослаблять излучение от поверхности нагретого вольфрама в силу того, что аппаратными средствами не удастся достигнуть схожего эффекта. Двенадцатибитные снимки содержат $2^{12} = 4096$ уровней сигнала, и даже если проводить преобразования коэффициента A согласно (10), не удастся добиться изменения в 20 раз за счет изменения времени экспозиции (минимальное значение которой составляет 7 мкс) и коэффициента усиления. Здесь необходимо уточнить, что на графике представлены значения уровней сигнала, которые снимались бы при условиях, отличающихся от условий калибровки (добавлялась бы диафрагма, изменялось время экспозиции или усиление). Чтобы их верно учесть, нужно умножать измеряемый уровень сигнала на коэффициент его уменьшения, который получился вследствие использования, например, диафрагмы (как это делалось при калибровке лампы).

Используя кривую (11), была проведена обработка снимка поверхности вольфрамовой мишени, сделанного с помощью камеры №1 с фильтром ОС-13 при значениях времени экспозиции и коэффициента усиления, используемых при калибровке. Результат представлен на рис. 24. В качестве мишени был выбран вольфрам, который предполагается к использованию для создания центральной части дивертора токамака ITER. В силу того, что температура быстро растет в области малых значений уровня сигнала (рис. 23, слева), даже небольшое влияние шумов, может дать просто огромную ошибку в определении температуры, сопоставимую (а иногда даже превосходящую) само значение температуры. Поэтому область с температурами ниже 500 К на картинке нельзя воспринимать как достоверные, кроме того, интерполяция была проведена для температур от 1000 К, так как меньшие значения не представляют интереса. В середине мишени видно наличие точек с температурой более 2300 К –

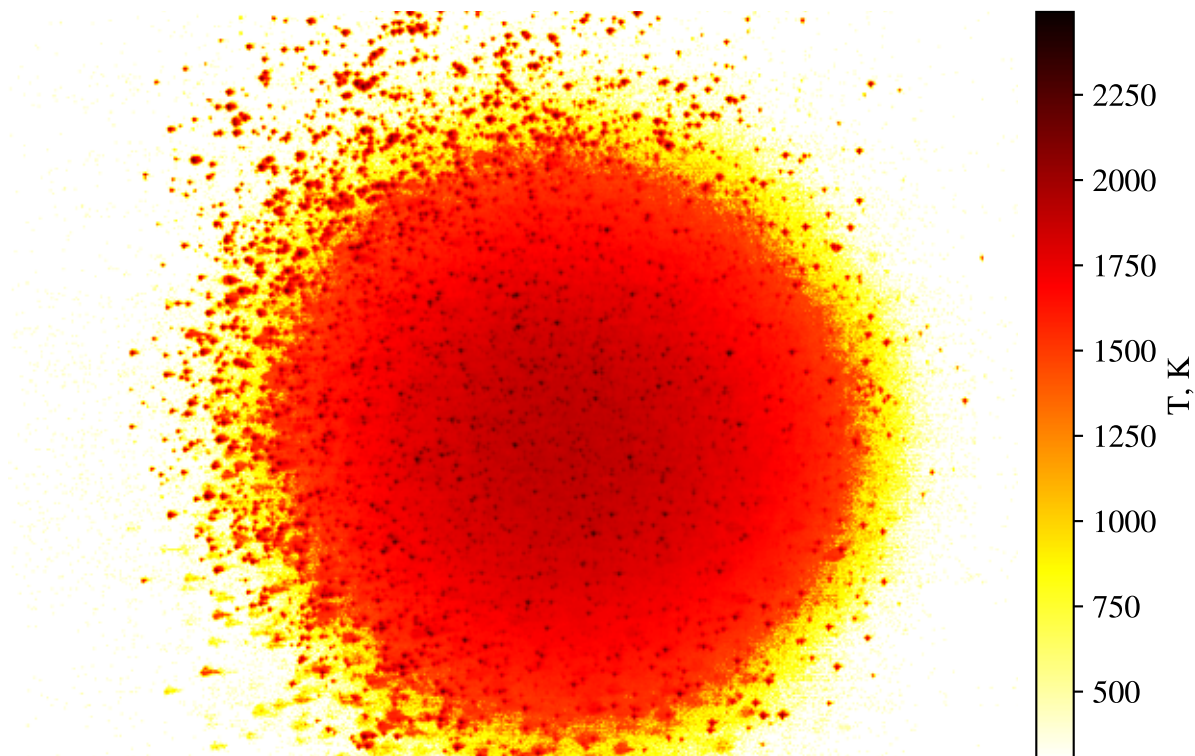


Рис. 24. Результат обработки снимка поверхности вольфрама, подвергающегося воздействию электронного пучка.

это соответствует уровню сигнала на исходном снимке, равному 4096, то есть максимуму, который может зарегистрировать камера в данных условиях. Есть вероятность, что эти точки гораздо горячее, и их излучение просто невозможно корректно зарегистрировать. Причиной перегрева этих небольших областей является нарушение отвода тепла от них вглубь материала из-за возникновения подповерхностных разрушений.

6. Заключение

В ходе выполнения работы была проведена калибровка специальной вольфрамовой ленточной лампы СИ-10-300 – была получена зависимость температуры ленты от мощности питания лампы. Результат может быть использован при калибровке и настройке любого пирометрического оборудования. Кроме того, важным этапом работы являлась проверка линейности характеристик ПЗС-камер SDU-285 в зависимости от мощности освещения матрицы, изменения времени экспозиции и изменения коэффициента усиления. Эта работа показала, что камеры допустимо использовать для проведения количественных измерений.

Основной целью работы была все же калибровка системы диагностики, состоящей из двух камер SDU-285, на определение распределения температуры по поверхности вольфрама, подвергающегося воздействию электронным пучком, двумя способами: по абсолютным значениям мощности излучения нагретого материала, и по отношению этих мощностей, измеренных двумя камерами с разными оптическими фильтрами (так называемая двухцветная пирометрия, позволяющая избавиться от влияния шероховатости поверхности). Дополнительно нужно было откалибровать систему из четырех лавинных фотодиодов для возможности получать временную эволюцию температуры в четырех точках на поверхности вольфрамовой мишени. Все полученные в ходе работы зависимости были интерполированы для наиболее удобного проведения расчетов.

Откалиброванная оптическая система ПЗС-камер была использована в реальном эксперименте для определения профиля температуры вольфрамового образца. Распределение температуры по поверхности (рис. 24) содержит горячие точки, имеющие значительно более высокую температуру, чем окружающая поверхность и более подвержены эрозии. Калибровка системы непрерывного наблюдения теплового свечения нагреваемой поверхности образца, состоящей из четырех лавинных фотодиодов, позволила следить за динамикой температуры поверхности одновременно с наблюдением развития её модификации в результате импульсного нагрева. Отслеживание модификации поверхности при этом обеспечивалось системой измерения рассеяния поверхностью излучения лазера.

Список литературы

1. Federici G., Loarte A., Strohmayer G. Assessment of erosion of the ITER divertor targets during type I ELMs // Plasma Physics and Controlled Fusion.– 2003.– No. 45.– P. 1523 - 1546.
2. Гаррисон Т. Р. (Перевод с англ. Антропова Е. Т. и др.) Радиационная пиromетрия.– М.: Издательство «МИР», 1964.– С. 18 - 19.
3. Howell J. R., Siegel R., Menguc M. P. Thermal Radiation Heat Transfer. 5 ed.– Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2010.– 949 p.
4. Pon R. M., Hessler J. P. Spectral emissivity of tungsten: analytic expressions for the 340-nm to 2.6- μm spectral region // Applied Optics.– 1984.– V. 23.– No. 7.– P. 975 - 976.
5. DeVos J. C. A new determination of the emissivity of tungsten ribbon // Physica 20, 1954.– P. 690 - 713.
6. Cagran C., Pottlacher G., Rink M., Bauer W. Spectral Emissivities and Emissivity X-Points of Pure Molybdenum and Tungsten // International Journal of Thermophysics.– 2005.– V. 26.– No. 4.– P. 1001 - 1007.
7. Gibson C. E., Tsai B. K., Parr A. C. Radiance Temperature Calibration.– Washington: U.S. Government Printing Office, 1998.– P. 11 - 14.

Приложение

P , Вт	a	b	c
7.73 - 17.3	418.068	0.42	0
17.95 - 55.03	692.54	0.244	$3.23 \cdot 10^{-8}$
56.9 - 195.08	798.29	0.21	0

Таблица 1. Коэффициенты для кривой вида $T = a \cdot P^b + c$, полученных методом наименьших квадратов при интерполяции зависимости температуры T от мощности питания лампы СИ-10-300.

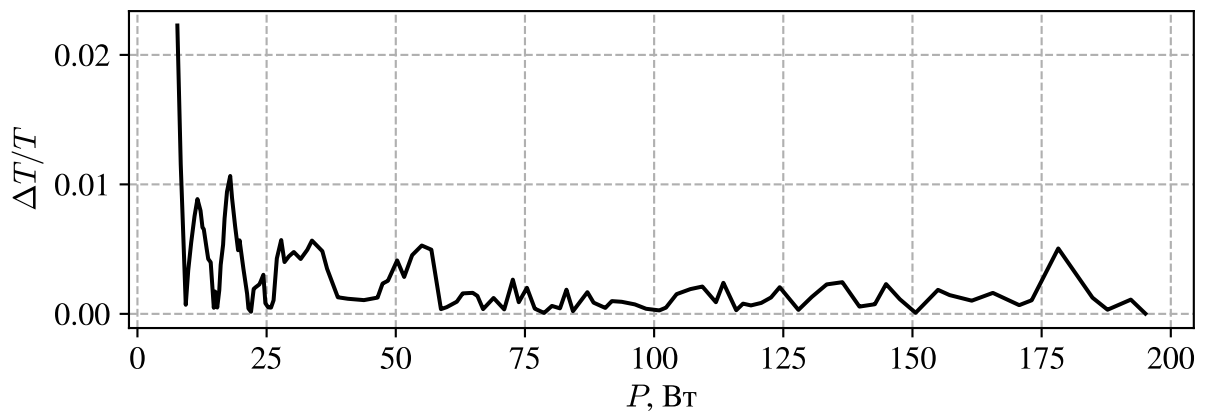


Рис. 25. Относительная ошибка при интерполяции зависимости температуры от мощности питания лампы.

Прибор	a	b	c
Камера №1 с фильтром ОС-13	175.55	0.239	1084.153
Камера №2 с фильтром ОС-13	322.65	0.195	812.242
Камера №1 с фильтром КС-19	425.36	0.173	664.403
Камера №2 с фильтром КС-19	395.33	0.181	680.196
Лавинный фотодиод №1	2495.93	0.117	0
Лавинный фотодиод №2	2079.56	0.149	431.024
Лавинный фотодиод №3	2228.75	0.128	186.478
Лавинный фотодиод №4	2822.3	0.133	0

Таблица 2. Коэффициенты для кривых вида $T = a \cdot x^b + c$, используемых для интерполяции зависимости температуры T от уровня сигнала x , получаемого с детектора.

Прибор	Серийный номер
Камера №1	1211
Камера №2	1212
Лавинный фотодиод №1	3801
Лавинный фотодиод №2	8402
Лавинный фотодиод №3	9899
Лавинный фотодиод №4	8411

Таблица 3. Соответствие откалиброванного оборудования с их серийными номерами.

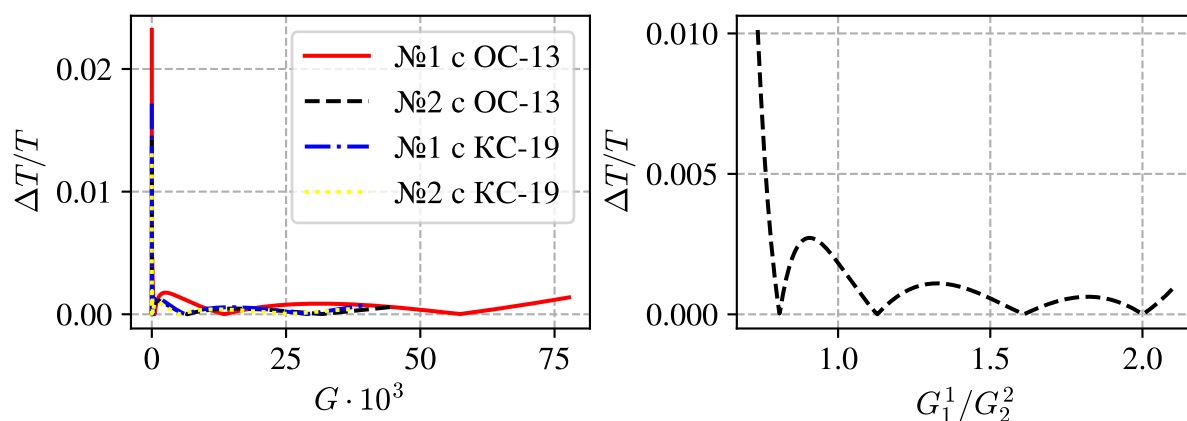


Рис. 26. Ошибки при интерполяции зависимостей температуры от уровня сигнала, регистрируемого камерами, и зависимости температуры от отношений уровней сигналов для камеры №1 с фильтром ОС-13 и камеры №2 с фильтром КС-19.

$T = a \cdot G^b + c \cdot G^{\frac{1}{6}} + d$				
Прибор	a	b	c	d
Камера №1 с фильтром ОС-13	0.041	0.804	398.495	736.183
Камера №2 с фильтром ОС-13	0.255	0.713	413.265	699.443
Камера №1 с фильтром КС-19	0.195	0.741	421.901	716.944
Камера №2 с фильтром КС-19	0.313	0.715	419.112	695.356
$T = a \cdot B^3 + b \cdot B^2 + c \cdot B + d$				
Прибор	a	b	c	d
Кам. №1 с ОС-13 и №2 с КС-19	264.73	-1004.08	3080.75	-818.446

Таблица 4. Параметры кривых для получения температуры по снимкам первым способом (по уровню сигнала G) и вторым (по отношениям уровней сигналов B для двух камер с разными фильтрами).