

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Информационно-измерительная техника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой, д.т.н., профессор.
_____/А.Л. Шестаков/
« ____ » _____ 2018 г.

Спектральная пирометрия на основе цифрового фотоаппарата

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР

Руководитель, к.т.н., профессор
_____/Ю.А. Усачев/
« ____ » _____ 2018 г.

Автор
студент группы КЭ-476
_____/В.К. Шилохвостов/
« ____ » _____ 2018 г.

Нормоконтроллер, доц. каф. ИНИТ
_____/А.С. Волосников/
« ____ » _____ 2018 г.

АННОТАЦИЯ

Шилохвостов В.К. Спектральная пирометрия на основе цифрового фотоаппарата. – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ-476; 2018, 76 с., 24 ил., библиогр.список – 21 наим.

В выпускной квалификационной работе рассмотрено несколько методов определения температуры тела накала эталонных ламп, являющихся первичными источниками метрологических комплексов и установок. Произведен обзор и анализ существующих оптико-электронных методов измерения температуры. Осуществлена оценка влияния изменения температуры тела накала эталонных ламп на их спектроэнергетические характеристики. Изучена возможность использования в качестве спектрального анализатора измерения цифрового фотоаппарата и получена оценка температуры тела накала эталонной лампы на основе RAW – конвертора. При наличии калибровочной характеристики эталонной лампы по СПЭЯ и спектральной излучательной способности материала тела накала, показана возможность получения величины температуры на основе использования формулы Вина.

Произведено сравнение и сделаны выводы по результатам определения температуры тела накала эталонной лампы на основе различных методов.

					КЭ-476. 12.03.01 ВКР			
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата				
Разработал		Шилохвостов			Спектральная пирометрия на основе цифрового фотоаппарата	Лит	Лист	Листов
Проверил		Усачев Ю.А.					4	
Н.контр.		Волосников				ЮУрГУ Кафедра ИнИТ		
Утвердил								

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	11
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПИРОМЕТРИИ, ОБЗОР МЕТОДОВ БЕЗКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ.	12
1.1 Аналитический обзор существующих методов пирометрии	12
1.1.1 Цветовые методы пирометрии	12
1.1.2 Яркостная пирометрия	16
1.1.3 Метод спектральная пирометрия	18
1.2 Описание принципов бесконтактного метода измерения температуры	21
1.2.1 Люминесцентный метод измерения температуры	21
1.2.2 Энергетические оптико-электронные системы измерения температуры.	23
1.2.3 Спектральные оптико-электронные системы измерения температуры.	28
1.2.4 Оптико-электронные системы измерения температуры объекта	32
1.3 Вывод по первой главе	38
2 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛА НАКАЛА НА ВЕЛИЧИНУ СПЭЯ	40
2.1 Расчет допускаемых отклонений температуры тела накала.	40
3 МАТРИЦА ЦИФРОВОГО ФОТОАППАРАТА. RAW-ФОРМАТ И RAW-КОНВЕРТОР. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО ФОТОАППАРАТА	47
3.1 Матрица цифрового фотоаппарата	47

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						5
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

3.2 RAW – формат	48
3.3 Разработка методики измерения и контроля температуры на основе цифрового фотоаппарат	50
3.3.1 Выбор длины волны для измерения температуры	50
3.3.2 Выбор цифровой камеры для измерений.	52
3.3.3 Процедура обработки изображений.....	53
3.3.4 Калибровка камеры.....	53
3.3.5 Оценка ошибок измерения.....	58
4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛА НАКАЛА ЭТАЛОННОЙ ЛАМПЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ КАЛИБРОВКИ В ЕДИНИЦАХ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ	59
4.1 Термометрия по тепловому излучению	59
4.2 Закон смещения Вина.....	61
4.3 Определение температуры методом спектральная пирометрия.....	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	73
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	74

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						6
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

ВВЕДЕНИЕ

Область науки и техники, связанную с использованием и преобразованием оптического излучения, принятого в настоящее время называть фотоникой.

Обладая уникальными свойствами, оптическое излучение находит все возрастающие сферы применения в науке, технике и производстве.

Сочетая в себе новейшие достижения оптики, электроники, эффективные методы обработки информации и прецизионные технологии, фотоника занимает одно из лидирующих направлений мирового развития.

В большинстве наиболее развитых стран Европы, Азии и Америки существуют государственные и межгосударственные стратегические программы развития фотоники на 10-20 летний период. В Российской Федерации так же разработан целый ряд программ, направленных на интенсификацию разработок в области фотоники.

Одним из важнейших направлений этих программ, обеспечивающим высокое качество и достоверность характеристик изделий и исследований, является метрологическое обеспечение фотоники.

В качестве наиболее распространенных исследуемых или контролируемых характеристик выступают интенсивность, спектральное и пространственное распределение излучения, относительная и абсолютная чувствительность существующих и перспективных приемников излучения, реакции взаимодействия излучения с различными материалами, веществами техническими или экологическими объектами.

Оптическое излучение используется при решении широкого круга фундаментальных и прикладных задач в астрономии, ракетно-космической, авиационной и электронной отраслях, в оборонной и пищевой промышленности, медицине, биологии, химии, мониторинге окружающей среды и дистанционного зондирования Земли.

					ИОУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						7
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

Каждое из направлений фотоники характеризуется специфическими особенностями, однако общим для них является требование наличия высокоточного оборудования, способного осуществлять метрологическое сопровождение при решении широкого круга научно-исследовательских и производственных задач.

Для решения этих задач требуется разработка, внедрения и совершенствования не только государственных поверочных схем и эталонов, но и наиболее приближенного к научным исследованиям и производству оборудования на уровне рабочих эталонов.

Именно от технических и метрологических характеристик таких устройств, поверочных и калибровочных установок и комплексов, в конечном счете, зависит качество получаемых результатов в науке и промышленности.

Разработка и создание автоматизированных метрологических комплексов и установок в области оптических измерений является актуальной.

Одним из важнейших путей повышения метрологических характеристик испытательных установок, является повышение точности воспроизведения оптического излучения рабочими эталонами, входящими в их состав. В качестве как государственных, так и рабочих эталонов в большинстве случаев применяются ленточные температурные лампы, градуированные в единицах спектральной плотности энергетической яркости.

Как любое средство измерений, первичные источники излучения, например температурные лампы, имеют установленный межповерочный интервал.

Однако с целью повышения надежности и точности измерений, проводимых на метрологических установках, желаемый текущий контроль спектроэнергетических параметров рабочих излучателей, определяемых температурой тела накала.

Поэтому контроль величины и стабильности температуры излучателей, является важной и актуальной задачей.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						8
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

В качестве современных специализированных бесконтактных средств измерений температурных полей объектов выступают пирометры и тепловизоры, в состав которых в качестве приемника излучения входят ПЗС матрицы. Однако существует возможность исследования высокотемпературных полей с помощью цифрового фотоаппарата, который позволяет произвести обработку цифровых температурных картин и получить характеристики распределения температуры на поверхности объекта, выявить дефекты, присутствующие на поверхности, нарушения однородности, определить теплофизические свойства материала.

Использование ПЗС – матрицы в трех спектральных диапазонах (RGB) и спектральных методов программной обработки изображения тела накала (RAW – формата), позволяет применить метод сличения.

Основное преимущество применения ПЗС состояний в том, что с их помощью можно реализовать излучение как пространственного, так и спектрального распределения исследуемых излучающих полей.

В настоящее время наиболее распространенным методом измерения температуры, обеспечивающим погрешность, измеряемую долями процента является метод спектрального отношения.

Основная идея метода заключается в измерении интенсивности излучения нагретых тел в двух выбранных спектральных интервалах.

Целью настоящей выпускной квалификационной работы является применение метода спектральной пирометрии на основе использования в качестве приемника излучения и спектрального анализатора цифровых фотоаппаратов.

Для достижения казанной цели необходимо решение следующих задач.

1. Провести аналитический обзор литературы и документации, посвященной бесконтактным методам измерения температуры и методам спектральной пирометрии.

2. Исследовать влияние изменения температуры тела накала эталонной лампы на величину спектральной плотности энергетической яркости.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						9
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

3. Произвести сравнительный расчет температуры эталонной лампы на основе известной для нее спектральной плотности энергетической яркости.

4. Разработать методику измерения и контроля температуры на основе цифрового фотоаппарат.

Актуальность метода спектральной пирометрии заключается в измерении температуры объектов с неизвестной излучательной способностью. Метод основан на регистрации широкого спектра излучения объекта, сравнении зарегистрированного спектра со спектром серого излучателя, выявлении участков, где наблюдается подобие спектров, и определении температуры как параметра распределения интенсивности в выбранных участках спектра, без привлечения данных об излучательной способности объекта.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						10
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ОЭС – Оптико-электронные системы.

ОЭСИТ – Оптико-электронные системы измерения температуры.

ОЭСИТ с СС – Оптико-электронные системы измерения температуры со статической системой.

ОЭСИТ и АС – Оптико-электронные системы измерения температуры с астатической системой.

ИК – Инфракрасный.

МОЭС – Многодиапазонные оптико-электронные системы.

СПЭЯ – Спектральная плотность энергетической яркости.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						11
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПИРОМЕТРИИ, ОБЗОР МЕТОДОВ БЕЗКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ.

1.1 Аналитический обзор существующих методов пирометрии.

1.1.1 Цветовые методы пирометрии

Цветовая пирометрия основана на том, что отношение интенсивностей излучения черного тела на двух длинах волн однозначно определяет температуру. На рисунке 1.1, представлена зависимость интенсивности излучения от длины волны, при температурах 1000 (1), 1500 (2) и 2000 (3) K черного тела.

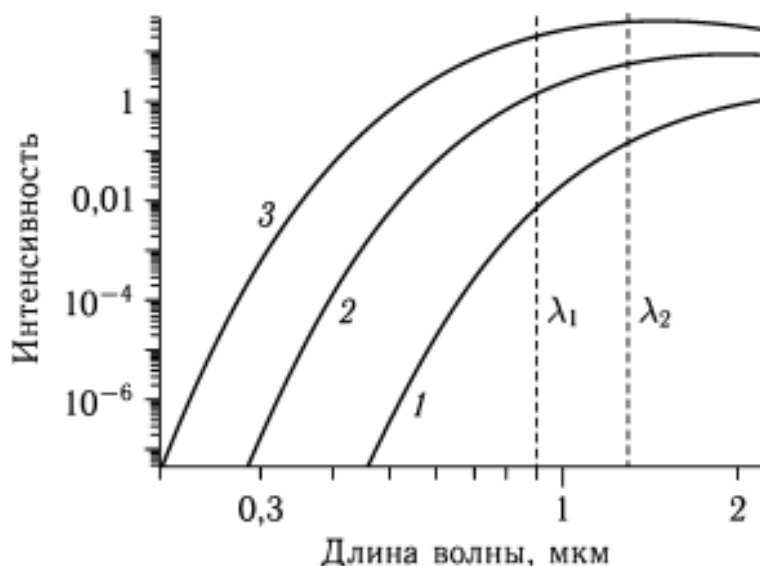


Рисунок 1.1 – Интенсивность излучения при температурах черного тела: 1000 (1), 1500 (2), 2000 K (3).

Отношения интенсивностей на двух длинах волн ($\lambda_1 = 0,9$ мкм и $\lambda_2 = 1,3$ мкм) монотонно уменьшаются с увеличением температуры [6].

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						12
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

Метод спектрального отношения состоит в измерении и сравнении интенсивностей излучения на двух длинах волн (λ_1 и λ_2). При этом число неизвестных всегда больше числа измеренных величин. Для нахождения температуры нечерного тела необходимо, чтобы число измеряемых величин равнялось числу неизвестных. Число неизвестных уменьшается, если известно отношение двух коэффициентов: [2]

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)}. \quad (1.1)$$

Связь между интенсивностью и длиной волны выражается формулой Планка:

$$N = \frac{C_1 \cdot \varepsilon(\lambda)}{\lambda^5 \cdot (\exp \frac{C_2}{\lambda \cdot T} - 1)}, \quad (1.2)$$

где $C_1=1.19 \cdot 10^{-24}$ – первая постоянная Вт*м²/ср;

$C_2=0.0144$ – вторая постоянная, К*м;

λ – длина волны;

$\varepsilon(\lambda)$ – коэффициент излучения,

T – температура, К.

При использовании точного выражения (формулы Планка) искомую цветовую температуру нельзя выразить явным образом, как в приближении Вина, и вычисление температуры проводится методом подгонки, при этом выбирается значение T , подстановка которого в уравнение приводит к наилучшему совпадению правой части (вычисляемой) и левой части (измеряемой экспериментально):[2]

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						13
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

$$\frac{I_2 \varepsilon_2}{I_1 \varepsilon_1} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \frac{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_1 T}\right) - 1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_2 T}\right) - 1}. \quad (1.3)$$

Если отношение $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ неизвестно, вычисляемая цветовая температура может существенно отличаться от действительной температуры.

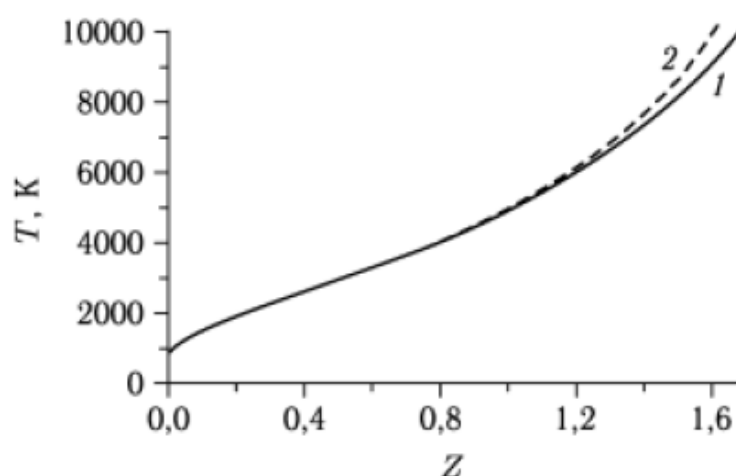


Рисунок 1.2 – Зависимость температуры от отношений действительных интенсивностей. Где 1 – кривая по модели Планка, 2 – по модели Вина.

Из рисунка 1.2 видно, что неточность в определении излучательной способности $\varepsilon_2(\lambda_2)$ и $\varepsilon_1(\lambda_1)$ может привести к существенной неточности определения температуры [1].

К достоинствам цветового метода можно отнести то, что точность метода, в разумных пределах, не зависит от расстояния до объекта, то есть точность измерений не зависит от пришедших сигналов от объекта. Это объясняется тем, что для определения температуры используется отношение измеренных интенсивностей объекта, следовательно, и отношение той составляющей погрешности сигналов, которая обусловлена расстоянием до объекта.

Как известно, при использовании метода цветовой пирометрия, измерения проходят на двух длинах волн, соответственно на λ_1 и λ_2 из видимой области спектра. Чаще всего этим длинам волн соответствуют значения от 500 до 700 нм, что позволяет измерять температуру объекта до 3000 К. Однако с увеличением потребности науки в регистрации температур более высоких порядков, метод стал непригодным. При температуре объекта свыше 10000 К понижается температурная зависимость наклона спектральной кривой Планка, для области 500 до 700 нм.

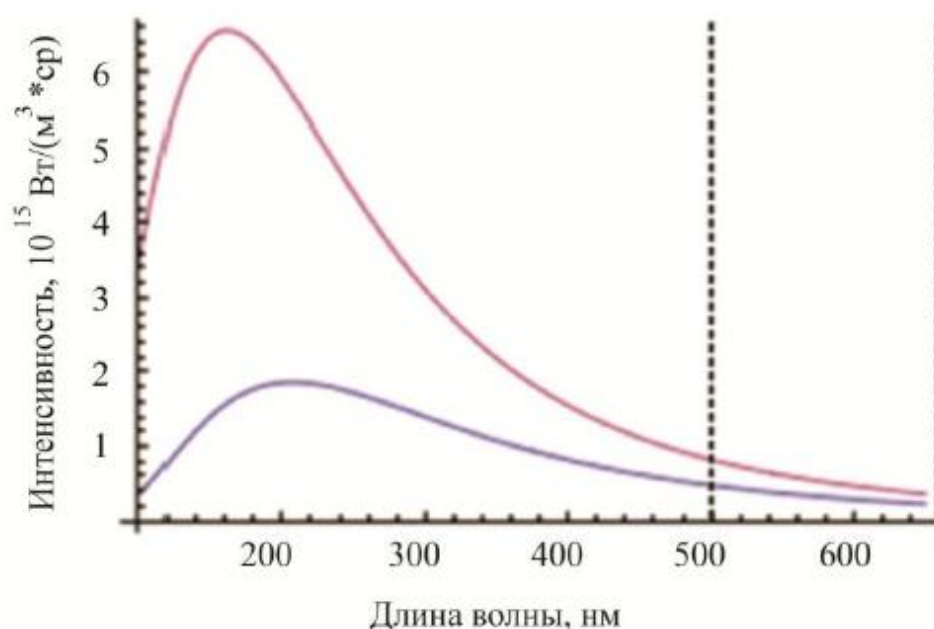


Рисунок 1.3 – Зависимость интенсивности излучения по модели Планка, при температурах 18000 К (красным) и 14000 К (синим). Пунктиром выделена область от 500 до 700 нм

Из рисунка 3.1, становится понятно, что температура является параметром распределения энергии в спектре излучения.

Область, выделенная пунктиром на рисунке 1.3, хорошо иллюстрирует понижение температурной зависимости наклона спектральной кривой Планка,

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						15
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

для области спектра от 500 до 700 нм. Другими словами, для области спектра от 500 до 700 нм труднее определить влияние температуры на форму распределения энергии в спектре, в отличие от области, к примеру, от 100 до 300 нм.

В связи с этим, появляется необходимость подтверждения соответствия спектра излучения объекта, спектру излучения черного тела. Для диапазона от 500 до 700 нм осуществить это подтверждение становится сложнее. Причиной этого является закон смещения Вина. Он гласит, что при больших температурах, максимум кривой Планка смещается в сторону УФ части спектра [3].

Метод мог быть хорошим, если бы конструкцию и элементы цветковых пирометров применяли должным образом для УФ части спектра. Более быстрое развитие спектральных методов пирометрии остановило развитие цветковых. Они стали очень успешно применяться там, где речь шла о веществах с известной излучательной способностью и температурах ниже, чем 3000 К.

1.1.2 Яркостная пирометрия

Яркостная пирометрия основана на том, что интенсивность излучения черного тела на выбранной длине волны определяется только температурой. Метод состоит в измерении интенсивности излучения I в одном узком спектральном интервале $\Delta\lambda$, практически на одной длине волны λ_l . Для черного тела через полученную точку $I(\lambda_l)$ проходит только одна планковская кривая. Для определения температуры нечерного тела необходимо знать коэффициент излучения на выбранной длине волны $\epsilon(\lambda_l)$ [2].

В качестве яркостного пирометра довольно часто используется пирометр с исчезающей нитью используемые в видимой части спектра излучения, с регистрацией сигнала при помощи глаза наблюдателя, то есть субъективно, называются оптическими [4].

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						16
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

Яркостная температура тела измеряется путем сравнения спектральной интенсивности излучения объекта измерения с интенсивностью излучения нити пирометрической лампы при одной и той же эффективной длине волны λ_0 . При этом яркостная температура нити лампы устанавливается градуировкой по абсолютно черному телу (по его модели) или по специальной температурной лампе.

Оптическая система пирометра позволяет создать изображение объекта измерения в плоскости нити пирометрической лампы. При использовании лампы переменного накала ее нить является переменным эталоном интенсивности излучения – последняя зависит от силы протекающего через нить тока. Таким образом, сила тока является мерой яркостной температуры. В момент достижения равенства спектральных интенсивностей излучения объекта измерения и нити лампы вершина нити исчезает на фоне свечения тела.

Схема оптического пирометра с исчезающей нитью переменного накала показана на рисунке 1.4.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						17
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

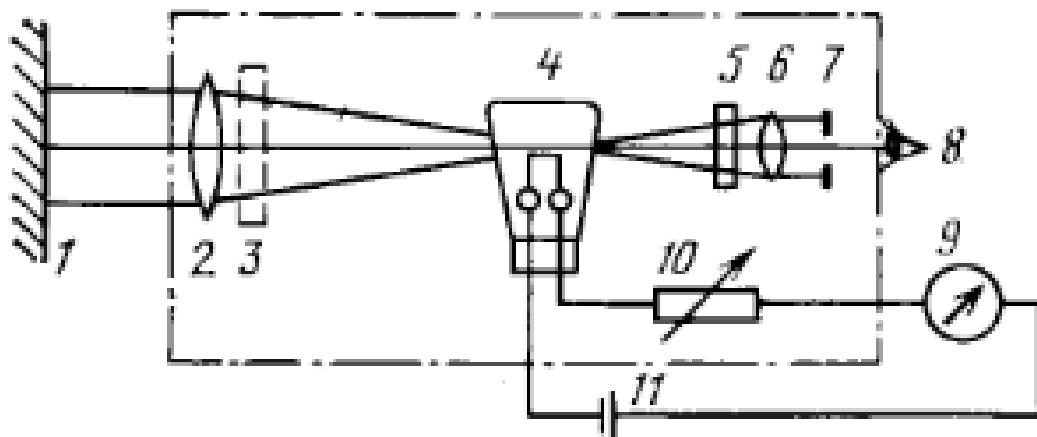


Рисунок 1.4 – Яркостный оптический пирометр с исчезающей питью переменного накала. 1 – исследуемый объект, 2 – объектив, 3 – светофильтр, 4 – лампа накала с эталонной нитью, 5 – стеклянный красный светофильтр, 6 – окуляр, 7 – диафрагма, 8 – глаз наблюдателя, 9 – миллиамперметр, 10 – реостат, 11 – батарея.

Из рисунка 1.4 понятно, что главным достоинством яркостного метода, по сравнению с другими, является простота и дешевизна осуществления метода. Это объясняется главным образом тем, что в качестве чувствительного элемента используется глаз оператора. Остальные элементы структурной схемы широко доступны и не несут в себе сложностей понимания работы.

Недостатками данного метода, можно считать особенности и ограниченность восприятия человеческого зрения. С учетом последнего, такие пирометры используются для определения температур до 6000 К [8].

1.1.3 Метод спектральная пирометрия

Спектральная пирометрия – это измерение температуры объектов с неизвестной излучательной способностью. Метод основан на регистрации широкого спектра излучения объекта, сравнении зарегистрированного спектра со

спектром серого излучателя, выявлении участков, где наблюдается подобие спектров, и определении температуры как параметра распределения интенсивности в выбранных участках спектра, без привлечения данных об излучательной способности объекта.

Недостатки известных методов пирометрии. Методы яркостной и цветовой пирометрии основаны на гипотезе о тепловом характере излучения, при этом проводится измерение интенсивности на одной (в яркостной) или на двух (в цветовой) длинах волн и вычисление температуры. Если мы ничего не знаем об оптических свойствах объекта, мы можем получить, лишь условные температуры – яркостную и цветовую. Обе они определяются в предположении, что объект является черным телом, то есть спектр его теплового излучения описывается законом излучения Планка.

Если мы знаем излучательную способность объекта (она же - коэффициент излучения или коэффициент черноты), то можно вычислить действительную температуру изотермического объекта.

Если же излучательная способность неизвестна (это обычная ситуация), или объект в области визирования неизотермический, или на фотоприемник попадает не только тепловое излучение объекта, но и излучение среды (плазмы, пламени), в которой он находится, или рассеянное излучение лазера (в лазерных технологиях обработки материалов), то трудности настолько возрастают, что температурные измерения, как правило, не проводятся. Выполнить измерения температуры с помощью оптической пирометрии таким образом, чтобы быть уверенным в полученном результате, довольно трудно, если речь идет о новых материалах и сложных экспериментальных условиях. Известные методы пирометрии хорошо работают, когда мы имеем дело с хорошо изученным материалом и простыми условиями измерений.

Преимущество спектральной пирометрии в том, что он позволяет получать существенно больше первичной информации об объекте, чем это доступно

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						19
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

традиционным методам. Вместо одного или двух значений интенсивности света мы регистрируем 2048 значений с помощью малогабаритного спектрометра с кремниевой ПЗС-линейкой фотоприемников или 512 значений с помощью линейки с фотоприемниками на основе GaInAs.

Это позволяет компенсировать недостаток исходных знаний об объекте, без которых традиционные методы работать не могут. В спектральной пирометрии нет необходимости заранее знать или предполагать, как изменяется излучательная способность с длиной волны излучения или с температурой. Информация об этом содержится в спектре теплового излучения. Не надо знать, является ли объект изотермическим, это тоже легко определить по особенностям спектра. Линии и полосы постороннего излучения (плазмы, пламени) легко выявляются и устраняются из спектра, чтобы температуру объекта можно было вычислять по непрерывному спектру.

Формула Планка давно известна, и давно созданы устройства, излучающие в соответствии с этой формулой (модели черного тела). Но измерять температуру по тепловому излучению реальных объектов довольно сложно, а иногда и совсем невозможно, потому, что реальные объекты существенно отличаются от черных тел. Эти отличия изучены для многих материалов, данные собраны в справочниках. Но неизученных материалов и объектов намного больше, чем изученных. И скорость, с которой растет количество неизученных материалов, намного выше, чем скорость, с которой изучаются оптические свойства.

И мы неизбежно приходим к задаче измерения температуры объектов с неизвестной излучательной способностью. Чтобы измерительный метод позволял нам не обращаться к справочникам, где собраны фрагментарные сведения об излучательной способности небольшой части материалов, применяемых в технике и технологии. Чтобы не требовалось предварительно измерять излучательную способность именно того объекта, температуру которого мы хотим определить.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						20
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

Эту задачу и позволяет решать спектральная пирометрия. В каждом эксперименте мы проверяем подобие полученного спектра спектру черного тела. Как правило, в каком-то интервале длин волн подобие наблюдается (по крайней мере, в коротковолновой области спектра – практически всегда). Подобие означает, что объект в выбранном интервале длин волн является серым излучателем. Температура определяется как параметр наблюдаемого распределения интенсивности в спектре. Это не условная температура, а термодинамическая.

То есть новизна спектральной пирометрии заключается в методике измерений, в той процедуре, выполнение которой позволяет определить температуру тогда, когда отсутствуют какие-либо данные – экспериментальные или расчетные – об излучательной способности объекта.

1.2 Описание принципов бесконтактного метода измерения температуры

1.2.1 Люминесцентный метод измерения температуры

В основе люминесцентных методов измерения температуры лежит температурная зависимость интенсивности люминесцентного излучения некоторых люминофоров, которое находит применение в различных датчиках измерения температуры и термопокрытиях.

Современные волоконно-оптические датчики позволяют измерять многие характеристики лабораторных и промышленных объектов, в частности температуру. Не смотря на то, что их использование достаточно трудоемко, оно дает ряд преимуществ, использования подобных датчиков на практике:

безындукционность (то есть неподверженность влиянию электромагнитной индукции); малые размеры датчиков, эластичность, механическая прочность, высокая коррозионная стойкость и так далее [5].

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						21
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

Датчик на основе теплового излучения.

В качестве устройств для измерения температуры могут быть использованы волоконно-оптические датчики на основе теплового излучения, сущность которых раскрываемая в частности в состоит в следующем. Изучаемое вещество при температуре большей 0 К вследствие тепловых колебаний атомов и молекул испускает тепловое излучение. Энергия излучения увеличивается по мере повышения температуры, а длина волны, на которой излучение максимально, уменьшается. Соответственно для определения температуры можно использовать формулу Планка для энергии теплового излучения черного тела на фиксированной длине волны или в диапазоне волн.

Основным преимуществом данного способа является возможность бесконтактного измерения высоких температур. В зависимости от диапазона измеряемых температур выбирают световые детекторы и оптические волокна. Область измерения температур для волоконно-оптических датчиков излучения находится в пределах от 400 до 2000 °С. При использовании оптических волокон, прозрачных для инфракрасных лучей с длиной волны 2 мкм и более, можно осуществлять измерение и более низких температур.

Датчик на основе поглощения света полупроводником.

Известны также волоконно-оптические датчики, работа которых основана на оптических свойствах некоторых полупроводников. Используемый полупроводник имеет граничную длину волны спектра оптического поглощения. Для света с более короткой длиной волны, чем у проводника, поглощение усиливается, причем по мере роста температуры граничная длина волны отодвигается в сторону более длинных волн (около 3 нм/К). При подаче на полупроводниковый кристалл луч от источника света, имеющего спектр излучения в окрестности указанной границы спектра поглощения, интенсивность света, проходящего через светочувствительную часть датчика, с повышением

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						22
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

температуры будет падать. По выходному сигналу детектора, указанным методом можно регистрировать температуру [5].

Используя данный метод можно мерить температуру в интервале от 30 до 300 °С с погрешностью $\pm 0,5$ °С.

Датчик на основе флуоресценции.

Данный датчик устроен следующим образом. На торец оптического волокна светочувствительной части нанесено флуоресцентное вещество. Флуоресцентное излучение, возникающее под воздействием ультрафиолетовых лучей, проводимых оптическим волокном, принимается этим же волокном. Температурный сигнал выявляется путем вычисления отношения соответствующих значений интенсивности флуоресцентного излучения для сигнала с длиной волны, сильно зависящего от температуры к интенсивности сигнала с другой длиной волны, слабо зависящего от температуры.

Область измеряемых температур таким датчиком находится в пределах от -50 до 200 °С с погрешностью $\pm 0,1$ °С.

Использование волоконно-оптических датчиков, при всей своей привлекательности, позволяет производить измерение температуры только в локальной точке объекта, что несколько сужает область их применения.

1.2.2 Энергетические оптико-электронные системы измерения температуры.

Оптико-электронные системы измерения температуры можно разделить на две группы: ОЭСИТ с компенсационной схемой измерения, рисунок 1.5:

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						23
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

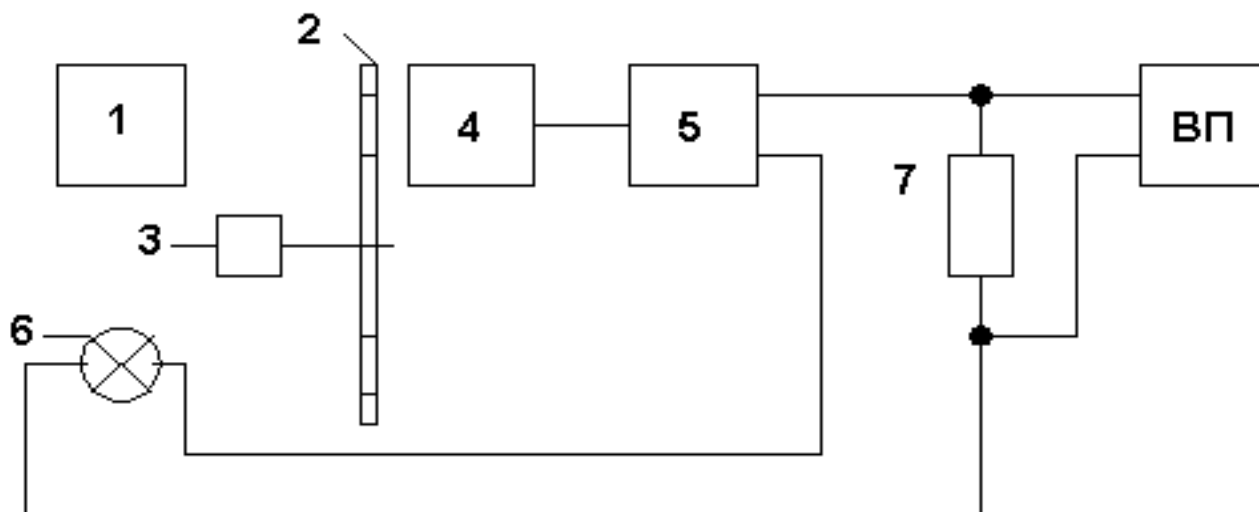


Рисунок 1.5 – ОЭСИТ с компенсационной схемой измерения.

И ОЭСИТ с непосредственным измерением сигнала на приемнике, рисунок 1.6:

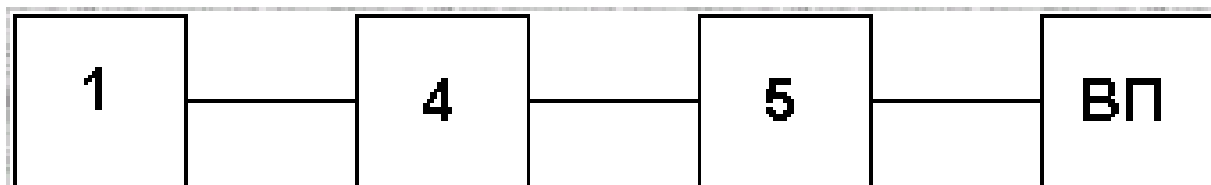


Рисунок 1.6 – ОЭСИТ с непосредственным измерением сигнала на приемнике

Оптико-электронные системы измерения температуры с компенсационной схемой могут быть выполнены с изменяющим температуру эталонным источником, температура которого поддерживается постоянной.

В ОЭСИТ первой группой приемник излучения 4 – попеременно воспринимает излучение от объекта, температура которого измеряется, и от образцового излучателя (эталонной лампы) – 6. Для переключения потоков используется вибратор – 3 и кадровые окна – 2.

Электрический сигнал на приемнике, пропорциональный разности потоков от объекта и излучателя, после усиления усилителем – 5 воздействует на температуру излучателя и изменяет ее до такого значения, когда поток от излучателя сравнивается с потоком от объекта. Температура объекта определяется по температуре излучателя или по параметру пропорциональному температуре излучателя (например, если излучатель – эталонная электрическая лампа, – то по току лампы, измеряемому вторичным прибором – 7).

По аналогии со статическими системами регулирования такие устройства будем называть ОЭСИТ со статической системой (ОЭСИТ с СС).

Обозначим поток, воспринимаемый приемником в зависимости от тока I через эталонную лампу, как $\Phi_3 = A_1 k_1 I$, а поток, воспринимаемый от объекта, – как $\Phi_n = A_2 q T^n$, где A_1 и A_2 – коэффициенты, характеризующие оптическую систему ОЭСИТ по потокам от эталонной лампы и объекта; k_1 – коэффициент, связывающий I с потоком ее излучения. Коэффициент усиления усилителя – 5 выбирается таким, что $\Phi_3 - \Phi_n \ll \Phi_n$.

При этом ограничением увеличивается коэффициент усиления усилителя является его устойчивость.

Тогда $\Phi_3 \approx \Phi_n$ и ток через эталонную лампу будет:

$$I = \frac{A_2 q}{A_1 k_1} T^n. \quad (1.4)$$

Для получения хорошего быстродействия, а так же для упрощения пирометра (эталонная лампа питается, как правило, от усилителя – 4) применяются лампы с тонкой нитью накала. Однако при этом для выполнения равенства $\Phi_3 = \Phi_n$ необходимо температуру нити лампы устанавливать большую, чем температура измеряемого тела, что ведет к сокращению диапазона измеряемого пирометра.

На рисунке 1.7 приведена зависимость $\Phi_{3T} / \Phi_{3400\text{ К}} = f(T)$ в диапазоне 400 – 2000 К (127 – 1727° С):

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						25
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

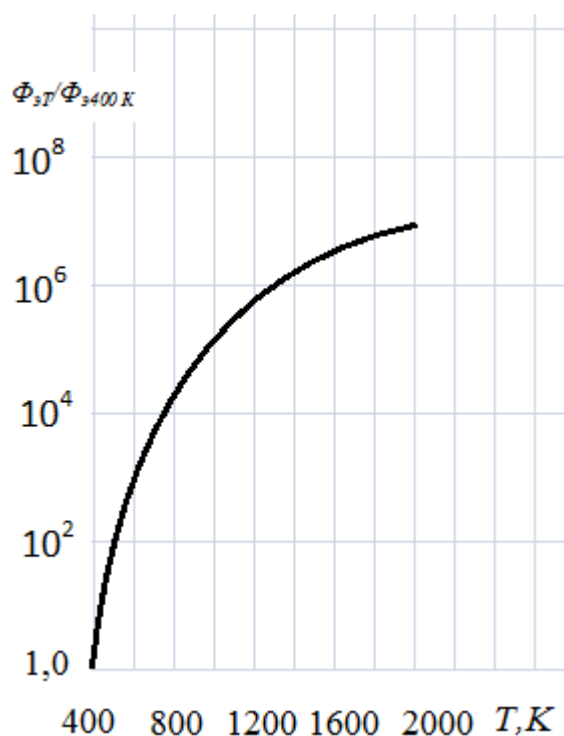


Рисунок 1.7 – Зависимость $\Phi_{3T}/\Phi_{3400K}=f(T)$ в диапазоне 400 – 2000 К (127 – 1727°С)

Для лампы с вольфрамовой нитью; максимальное значение температуры нити лампы определяются стабильностью характеристики $I=f(T)$.

Температура нити эталонной лампы, при которой на приемнике возникает необходимый сигнал (при оптической системе, аналогичной пирометру ФЭП-4), составляет 700-800°С.

В ОЭСИТ, выполненных по компенсационной схеме, в которых температура эталонного излучателя поддерживается постоянной, потоки уравниваются с помощью редуцирующего устройства (сетка с переменной плоскостью, клина, диафрагмы и др.), вводимого или между компенсационной лампой и приемником излучения, или в оптический поток исследуемого тела. Положение редуцирующего устройства пропорционально температуре объекта.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						26
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

Такие устройства назовем ОЭСИТ с астатической системой (ОЭСИТ и АС).

Разностный сигнал, пропорционален $\Delta\Phi = \Phi_{\text{э}} - \Phi_{\text{п}}$, после усиления усилителем 5, поступает на двигатель 7, который через редуктор 8 перемещает редуцирующее устройство 9 до такого положения, когда $\Delta\Phi \approx 0$.

Обозначим: $x = l/L$ – относительное положение редуцирующего устройства (где l – абсолютное положение редуцирующего устройства); L – максимальное значение l и $t = kx$ – коэффициент пропускания редуцирующего устройства; $0 \leq x \leq 1$.

Тогда

$$x = \frac{A_2 q_1}{A_1 k_3 k} T^n, \quad (1.5)$$

где k – коэффициент пропорциональности между положением редуцирующего органа и его прозрачностью;

k_3 – коэффициент, характеризующий излучение эталонной лампы.

Выбирая необходимый закон измерения $t = f(x)$, можно получить любую зависимость $x = f(T)$.

В ОЭСИТ с АС основной проблемой является разработка редуцирующего устройства, плавно меняющего коэффициент редукции в широком диапазоне. Для уменьшения коэффициента редукции редуцирующие элементы можно использовать как в компенсационном, так и в основном канале, причем их работа синхронизирована таким образом, что в начале диапазона редуцирующий элемент в компенсационном канале установлен на минимальное пропускание, а в основном канале на максимальное. При увеличении температуры объекта коэффициент пропускания редуцирующего устройства компенсационного канала увеличивается, а у основного канала – уменьшается [5].

Достоинством такой схемы являются: меньший диапазон изменения редуцирующего устройства; более широкая возможность изменения зависимости

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						27
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

$x=f(T)$; меньший диапазон изменения сигнала на приемнике и на выходе усилителя.

Основная причина появления погрешности в ОЭСИТ компенсационного типа – изменения характеристик компенсационной лампы во времени и от окружающей температуры.

Нестабильность параметров лампы требует применения специальных мер, уменьшающих ее влияние.

В ОЭСИТ с непосредственным измерением электрический сигнал на приемнике равен:

$$\alpha = U_{\text{ВЫХ}} = kAQ\lambda^{-5}e^{\frac{-c_2}{\lambda T}} = kAqT^n. \quad (1.6)$$

Этот вариант ОЭСИТ является практически основным в системах, использующих весь спектр излучения или большую его часть (например, при использовании тепловых приемников излучения, термобатарей или болометров).

Особенностью ОЭСИТ с непосредственным изменением сигнала является нелинейный вид зависимости выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ}}$ от температуры, что требует специальных схем линеаризации.

1.2.3 Спектральные оптико-электронные системы измерения температуры.

Классификация спектральных ОЭСИТ

Оптико-электронные системы измерения температуры, использующие спектральное распределение, по принципу измерения температуры разделяются на три группы:

1- ОЭСИТ, в которых излучение в двух участках спектра от измеряемого тела сравнивается с излучением от эталонного излучателя модели «черного тела» или температурой лампы. Температура эталонного излучателя контролируется

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						28
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

термопарами или косвенным методом (для эталонных температурных ламп – по току накала).

Большая инерционность эталонных температурных источников препятствует распространению таких ОЭСИТ.

2- ОЭСИТ, у которых измерение отношения двух потоков излучения с различными спектральными составами осуществляется по положению редуцирующего устройства, вводимого в один из потоков;

3- ОЭСИТ, в которых непосредственно по излучению в двух участках спектра определяется отношение потоков, а следовательно и температура.

По принципу измерения отношения двух потоков ОЭСИТ могут быть разделены на двухканальные и одноканальные. В двухканальных ОЭСИТ измеряемые потоки отдельно преобразовываются в электрический сигнал приемниками, отдельно усиливаются усилителями (которые иногда отсутствуют) и подаются в вычислительное устройство, где и вычисляется их отношение. В одноканальных системах используется один приемник, на который поочередно падают измеряемые потоки, и один усилитель. Применение одноканального метода позволяет исключить влияние измерения коэффициента преобразования и коэффициента усиления усилителя.

При необходимости введения усилителя между приемником излучения и вычислителем отношения наиболее рациональной схемой ОЭСИТ является одноканальная схема. Однако при этом надо учитывать, что быстродействие одноканальных ОЭСИТ значительно хуже, чем двухканальных.

Рассмотрим некоторые из возможных вариантов преобразования отношения потоков (или непосредственно самих потоков) в электрический сигнал.

1. Преобразование потоков в поочередно следующие трапецеидальные импульсы.

Параметры импульсов определяются формой кадрового окна и окна на диске обтюратора. Если кадровые окна и окна на обтюраторе выполнены в виде

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						29
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

секторов, то на приемнике излучения формируются трапецеидальные импульсы, имеющие форму, показанные на рисунок 1.8:

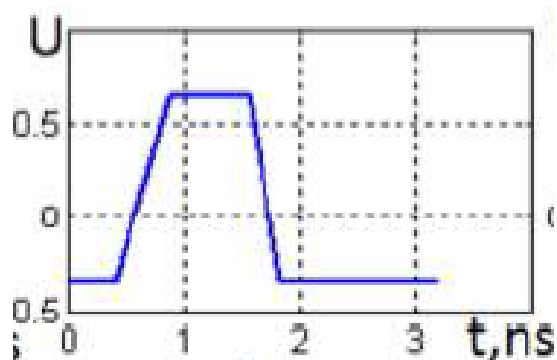


Рисунок 1.8 – Форма трапецеидального импульса

В дальнейшем при анализе измерительных схем представляет интерес параметры импульсов не относительно их начала, а относительно нулевой линии U_0 , определяемой выражением $\int_0^{\infty} (U - U_0) dU = 0$

2. Преобразование отношения потоков в синусоидальное напряжение, коэффициент модуляции которого пропорционален отношению потоков.

Если на приемнике поочередно подаются предварительно промодулированные по синусоидальному закону два потока, то электрический сигнал на приемнике имеет вид, показанный на рисунок 1.9:

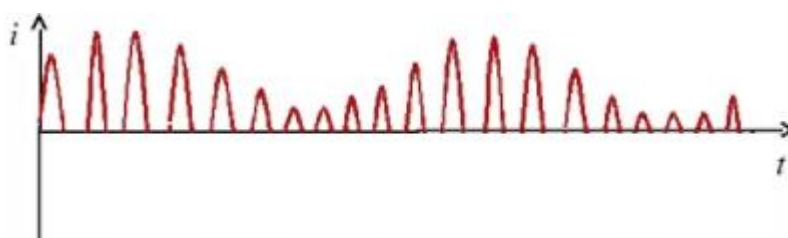


Рисунок 1.9 – Форма сигналов на выходе приемника излучения

А после прохождения через узкополосный усилитель – вид, показанный на рисунок 1.10:

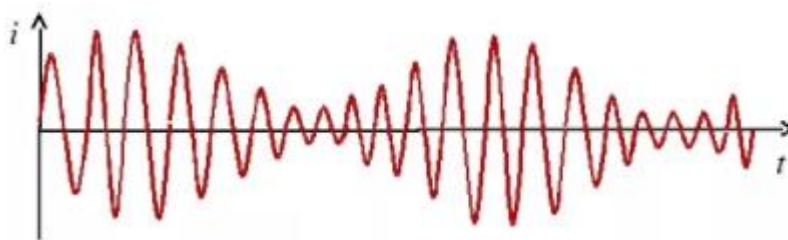


Рисунок 1.10 – Форма сигналов на выходе узкополосного усилителя

То есть будет синусоидальным напряжением, модулированный по амплитуде. Коэффициент глубины модуляции этого напряжения пропорционален отношению потоков y :

$$m = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2} = \frac{y - 1}{y + 1} \quad (1.7)$$

3. Преобразование потоков в синусоидальное напряжение, фаза которого пропорциональна отношению потоков.

Поток от измеряемого объектов разделяется на два потока и модулируется. Форма кадровых окон на обтюраторе и неподвижные кадровые окна выбираются таким образом, чтобы потоки модулировались по синусоидальному закону:

$$\Phi_1 = \Phi_{01} \sin \omega t. \quad (1.8)$$

$$\Phi_2 = \Phi_{02} \sin(\omega t - \theta). \quad (1.9)$$

Таки образом, на приемнике при действии первого и второго потоков возникают сигналы

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						31
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

$$U_1 = U_{\max} \sin \omega t. \quad (1.10)$$

$$U_2 = U_{\max} \sin(\omega t - \theta). \quad (1.11)$$

Результирующий сигнал будет равен

$$U_p = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos \theta}. \quad (1.12)$$

Или относительных единицах (относительно U_2)

$$\frac{U_p}{U_2} = \sqrt{1 + y^2 + 2y \cos \theta}. \quad (1.13)$$

Угол между U_p и U_2 составляет

$$\varphi = \text{arcctg} \frac{1}{\sin \theta} (y + \cos \theta), \quad (1.14)$$

где θ – фазовый угловой сдвиг между модулированными потоками;

y – отношение потоков.

Таким образом, угол φ при $\theta = \text{const}$ однозначно определяет отношение двух потоков.

1.2.4 Оптико-электронные системы измерения температуры объекта.

Априорное знание температуры поверхности наблюдаемого объекта или соответствующих рабочим спектральным диапазонам многодиапазонные оптико-

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						32
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

электронные системы спектральных отношений позволяет эффективно выделять наблюдаемые объекты на фоне помех [5].

При измерении сигналов в узких спектральных рабочих диапазонах (полосах) важно исключить или учесть влияние селективной излучательной способности ξ_λ наблюдаемой поверхности на сигнал в виде яркости или потока, приходящего на вход МОЭС.

При спектрорадиометрических измерениях и сопутствующей им спектральной фильтрации возникает другая проблема – исключение или учет той составляющей сигнала от наблюдаемого объекта, которая обусловлена отражением от поверхности объекта излучения, создаваемого посторонними источниками. Зачастую именно эта составляющая является основной в общей структуре энергетической модели ОЭС. Так, при работе в дневных условиях многих ОЭС дистанционного зондирования в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах преобладает отраженная составляющая, создаваемая солнечным излучением. В этих случаях выделение объекта на фоне помех затруднено из-за спектральной селективности и неопределенности как облученности E_λ , создаваемой на наблюдаемой поверхности, так и отражательной способности поверхности ρ_λ .

При работе в длинноволновом ИК-диапазоне (8...14 мкм) во многих практических случаях принимается, что в сигнале наблюдаемого объекта преобладает собственное (тепловое) излучение поверхности с температурой T и излучательной способностью ξ_λ .

Наиболее сложным случаем является тот, когда ОЭС работа в средневолновом ИК-диапазоне (обычно 3...5 мкм), где часто необходимо учитывать как отраженное, так и собственное излучение объекта.

Многочисленными исследованиями радио- и спектрорадио- метрических ОЭС было установлено, что достижение достаточно высокой точности определения поверхностной температуры объекта, а следовательно, хорошей эффективности

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						33
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

спектральной радиометрической фильтрации, возможно при использовании трех – четырех рабочих спектральных диапазонов или рабочих длин волн.

Можно рассмотреть достаточно простую, но адекватную многим встречающимся на практике ситуациям энергетическую модель ОЭС, когда спектральная плотность потока излучения Φ_λ приходящего на вход системы, определяется как сумма спектральных плотностей собственного теплового излучения непрозрачного плоского или выпуклого объекта и отражаемого им излучения, создаваемого посторонними облучающими объект источниками:

$$\Phi_\lambda = \frac{A_0 A_{\text{вх}}}{l_0^2} [\tau_{\text{с0}\lambda} \varepsilon_\lambda L_\lambda(T_0) + (1 - \varepsilon_\lambda) \sum_i \tau_{\text{сi}\lambda} L_{i\lambda} \Omega_i / 4\pi], \quad (1.15)$$

где A_0 – видимая площадь объекта;

$A_{\text{вх}}$ – площадь входного зрачка ОЭС;

l_0 – расстояние между объектом и ОЭС;

$\tau_{\text{с0}\lambda}$ – спектральный коэффициент пропускания среды на трассе «объект ОЭС»;

$\tau_{\text{сi}\lambda}$ – спектральный коэффициент пропускания среды на трассе «объект i -й источник»;

ξ_λ – излучательная способность видимой поверхности объекта;

$L_\lambda(T_0)$ – зависимость яркости поверхности объекта от ее температуры T_0 ;

$L_{i\lambda}$ – яркость i -го протяженного источника, обычно принимаемого за черное тело с температурой T_i и $\xi_{i\lambda} = 1$;

Ω_i – телесный угол, под которым i -й источник наблюдается от объекта. Предполагается, что излучение, попадающее на объект от посторонних источников, рассеивается его поверхностью в соответствии с полусферической отражательной способностью $\rho_\lambda = 1 - \xi_\lambda$ в телесном угле 4π стерадиан.

В пределах спектральной полосы поток излучения принимается равным:

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						34
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

$$\Phi_{\Delta\lambda} = \int_{\Delta\lambda} \Phi_{\Delta} d\lambda. \quad (1.16)$$

В достаточно общем виде сигнал, определяемый только собственным излучением объекта и получаемый на выходе приемника излучения со спектральной чувствительностью $S_{\lambda i}$ на длине волны λ_i , описывается как:

$$U_i = K \cdot \varepsilon_{\lambda i} L_{\lambda i} \tau_{0\lambda i} S_{\lambda i}, \quad (1.17)$$

где K – постоянная, определяемая геометрическими параметрами ОЭС, не зависящими от длины волны излучения;

$\tau_{0\lambda i}$ – коэффициент пропускания оптической системы на длине волны λ_i .

Для двух длин волн λ_1 и λ_2 (узких рабочих спектральных диапазонов, внутри которых спектральные параметра ξ_{λ} , L_{λ} , τ_{λ} и S_{λ} могут быть приняты постоянными) спектральное отношение

$$\frac{U_1}{U_2} = f(T_0) = \frac{\varepsilon_{\lambda 1} \tau_{0\lambda 1} S_{\lambda 1} \lambda_1^{-5} \exp(-c_2/\lambda_1 T_0)}{\varepsilon_{\lambda 2} \tau_{0\lambda 2} S_{\lambda 2} \lambda_2^{-5} \exp(-c_2/\lambda_2 T_0)}. \quad (1.18)$$

Здесь используется упрощенная формула закона Планка для черного тела с температурой T :

$$L_{\lambda} = (1/\pi) c_1 \lambda^{-5} \exp(c_2/\lambda T), \quad (1.19)$$

где C_1 и C_2 – постоянные закона Планка.

Температура объекта T_0 может быть найдена путем логарифмирования отношения сигналов U_1/U_2 (спектрального отношения) и решения полученного уравнения относительно T_0 :

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						35
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

$$\begin{aligned}
T_0^{-1} &= \frac{\lambda_1 \lambda_2}{c_2(\lambda_1 \lambda_2)} [\ln(U_2/U_1) + \ln(\tau_{0\lambda_1}/\tau_{0\lambda_2}) + \ln(S_{\lambda_1}/S_{\lambda_2})] \\
&= 5\ln(\lambda_2/\lambda_1) + \ln(\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2})
\end{aligned}
\tag{1.20}$$

Если наблюдаемый объект – серое тело с $\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2} = \varepsilon = \text{const}$, то, измеряя отношение U_1/U_2 , при известных конструктивных параметрах ОЭС $\lambda_1, \lambda_2, \tau_{0\lambda_1}, \tau_{0\lambda_2}, S_{\lambda_1}$ и S_{λ_2} легко определить температуру объекта T_0 . Если же наблюдаемый объект – селективный с $\varepsilon_{\lambda} = f(\lambda, T)$, использование последнего выражения для нахождения T_0 ведет к погрешности, равной:

$$\Delta T_0 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 T_0^2 \ln(\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2})}{\lambda_1 \lambda_2 T_0 \ln(\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2}) + c_2(\lambda_1 - \lambda_2)}.
\tag{1.21}$$

Этот метод можно использовать для определения температуры атмосферы с целью учета ее влияния на сигналы, принимаемые ОЭС. Для этого измерение спектрального отношения U_1/U_2 необходимо вести в тех участках спектра (на длинах волн λ_1 и λ_2), где атмосфера полностью поглощает проходящее через нее излучение и является практически черным телом с $\xi_{\lambda_1} = \xi_{\lambda_2} = 1$. Иногда для определения T_0 можно воспользоваться базами данных об излучительных способностях ξ_{λ} многих типовых материалов.

В радиационной пирометрии для разделения вклада ξ_{λ_i} и T_0 в результаты измерений сигналов U_{λ_i} , то есть для учета или коррекции влияния априори неизвестной величины ξ_{λ_i} на результаты измерения температуры T_0 , неоднократно предлагается метод средней квадратической минимизации разности измеренных сигналов $U_{\lambda_{\text{ин}}}$ сигналов $U_{\lambda_{\text{ин}}}$, соответствующих некоторой априорно принимаемой модели ξ_{λ} . В качестве такой модели принимались полиномы вида $\xi_{\lambda} = a_0 + a_1 \lambda +$

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						36
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

$a_2\lambda^2+\dots$ или $\xi_\lambda=a_0+a_1/\lambda+a_2/\lambda^2+\dots$, в которых коэффициенты a_0, a_1, a_2, \dots на первом этапе расчета являются неопределенными.

Соответственно можно представить и сигнал U_i , образующий на выходе приемника излучения на длине волны λ_i (в узкой i -й спектральной полосе), как линейную функцию вида:

$$U_i = a_0 f_{a_0}(\lambda_i, T_0) + a_1 f_{a_1}(\lambda_i, T_1) + a_2 f_{a_2}(\lambda_i, T_2) + \dots \quad (1.22)$$

где $f_{a_0}, f_{a_1}, f_{a_2}$ и так далее – нелинейные функции температуры объекта T_0 .

Модель ξ_λ в виде базисных ортогональных полиномов Лежандра или Чебышева $P_{j\lambda}$ со свободными параметрами λ , то есть:

$$\varepsilon_\lambda = \sum_{j=1}^N a_j P_{j\lambda}. \quad (1.23)$$

Первые четыре полинома Лагранжа имеют вид:

$$P_{1\lambda} = 1,$$

$$P_{2\lambda} = \lambda,$$

$$P_{3\lambda} = 0,5(3\lambda^2 - 1),$$

$$P_{4\lambda} = 0,5(5\lambda^3 - 3\lambda),$$

А для полинома Чебышева

$$P_{1\lambda} = 1,$$

$$P_{2\lambda} = \lambda,$$

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						37
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

$$P_{3\lambda} = 2\lambda^2 - 1,$$

$$P_{4\lambda} = 4\lambda^3 - 3\lambda,$$

Имея ряд измерений сигнала $U_{\lambda_{in}}$ в M спектральных диапазонах, необходимо минимизировать сумму средних квадратичных разностей между результатами этих измерений $U_{\lambda_{in}}$ и принятой априорно моделью:

$$U_{\lambda_{im}}: \sum_{i=1}^M (U_{\lambda_{in}} - U_{\lambda_{im}})^2. \quad (1.24)$$

Результат этой нелинейной минимизации позволяет определить значение параметров модели a_0, a_1, a_2 и так далее, наиболее близкие к полученным при измерениях данным.

После вычисления ξ_λ для всех M рабочих диапазонов МОЭС можно найти однозначное соответствие между сигналами $U_{\lambda_{in}}$, образующимися в этих диапазонах, и температурой объекта T_0 , а затем осуществить выбранный алгоритм спектрорадиометрической фильтрации [5].

1.3 Вывод по первой главе.

- Спектральная пирометрия, в настоящее время, является один из перспективных и быстро развивающимся направлением оптической пирометрии. Данный метод существенно отличается от традиционных методов, таких как яркостной и цветовой пирометрии, тем что измерения проводятся на сотнях и на тысячах длин волн, тем самым позволяют получить, более подробную информацию об исследуемом объекте.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						38
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

- Цветовые методы, хорошо применимы для регистрации температур тех веществ, которые хорошо изучены и для них известно значение излучательной способности $\epsilon(\lambda)$.

- Яркостные методы хорошо применимы там, где нет необходимости проводить измерения температуры на ограниченном временном промежутке. Это касается как оптических, так и фотоэлектрических методов. Для измерения температур в рамках экспериментов по ударному сжатию, быстродействию, на сегодняшний момент, становится главным требованием. Как уже говорилось, в таких экспериментах исследуемые процессы происходят очень быстро, порядка 1 мкс.

В оптических методах яркостной пирометрии, для сличений яркости эталонной нити и объекта излучения используются зрительные способности оператора. Понятно, что оператор не сможет обеспечить должного быстродействия для проводимого эксперимента.

- Люминесцентный метод менее сложный при организации процесса изучения температуры и не менее точный, по сравнению с другими оптическими методами. Кроме того, использование свойств люминесценции предоставляет возможность измерять температуру сложных геометрических фигур, при разработке методов измерения температурных полей объектов.

- Одним из основных средств для быстрого бесконтактного контроля и измерения температуры, являются оптико-электронные системы измерения температуры (ОЭСИТ), которые объединяют широкий ряд приборов: оптические пирометры, измерительные пирометрические системы, тепловизоры, сканирующие пирометры, анализаторы температурного поля и так далее. Высокие технико-эксплуатационные характеристики ОЭСИТ в сочетании с их широким серийным освоением позволяют применять их в самых различных отраслях хозяйства, науки и техники.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						39
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

2 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛА НАКАЛА НА ВЕЛИЧИНУ СПЭЯ

2.1 Расчет допускаемых отклонений температуры тела накала.

Для измерений оптического излучения удобной величиной, является спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ), представляющая собой поток, приходящийся на единичный интервал длин волн в направлении нормали к поверхности в пространственном угле в один стерадиан.

В соответствии с законом Планка в связи с тем, что спектральная характеристика излучения зависит от температуры, необходимо установить степень этого влияния. Это в свою очередь позволяет сформулировать требования к аппаратным устройствам метрологических комплексов, таких как точность установки и поддержания тока и напряжения питания тела накала эталонных ламп, а так же температуры их окружающей среды.

Межповерочный интервал делается раз в год-два в зависимости от разряда эталона. Откуда возникает проблема с целью повышения метрологической надежности установок. Существуют небольшие структуры комплексов, где должна быть лампа накаливания, выполняющая роль вторичного эталона соответствующего разряда.

Лампа применяется для калибровки и поверки оптических приборов.

Рассмотрим влияние на величину СПЭЯ ошибки в определении температуры ленты лампы.

Для расчетов воспользуемся формулой Вина

$$B_{\lambda} = \frac{C_1}{\pi} \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{\frac{-C_2}{\lambda \cdot T}}, \quad (2.1)$$

где C_1 и C_2 – первая и вторая постоянные;

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						40
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

Дифференцируя формулу Вина по температуре T , получим

$$\frac{\partial B_{\lambda}}{\partial T} = \frac{C_1}{\pi} \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{\frac{-C_2}{\lambda \cdot T}} \cdot \frac{C_2}{\lambda \cdot T^2}. \quad (2.2)$$

Спектральная яркость черного тела в соответствии с законом Планка

$$B(\lambda T) = \frac{C_1}{\pi} \cdot \lambda^{-5} \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1)^{-1}, \quad (2.3)$$

где $C_1 = 2\pi c^2 h = 3,7413 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$;

$C_2 = \frac{ch}{k} = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$

В оптическом диапазоне вплоть до $\lambda \approx 1 \text{ мкм}$ обычно используют формулу Вина в виде:

$$B(\lambda T) = \frac{C_1}{\pi} \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{\frac{-C_2}{\lambda \cdot T}}. \quad (2.4)$$

Яркость – отношение силы излучения к площади, с которой воспринимается излучение.

Из формулы (2.4) следует, что:

$$\frac{\partial B_{\lambda}}{\partial T} = B_{\lambda} \cdot \frac{C_2}{\lambda \cdot T^2}. \quad (2.5)$$

Или окончательно получим:

$$\Delta T = \frac{\Delta B_{\lambda}}{B_{\lambda}} \cdot \frac{\lambda \cdot T^2}{C_2}. \quad (2.6)$$

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						41
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

Задаваясь величиной рабочей температуры тела накала лампы и допусковым значением изменения спектральной плотности энергетической яркости ΔB_λ , можно получить семейство допусковых отклонений температуры тела накала, для заданного спектрального диапазона. Например, при $T=2400\text{ K}$ и допусковом изменении СПЭЯ в 1% в диапазоне длин волн $\lambda=(300\dots1200)$ нм, отклонение температуры составляет $(1,2\dots4,8)\text{K}$ при постоянном градиенте $\frac{\Delta T}{\Delta \lambda} = 4 \cdot 10^{-3}\text{ K}\cdot\text{нм}^{-1}$.

Произведем расчет допусковых отклонений температуры тела накала исходя из характеристик комплекса и требований ГОСТ 8.195-2013.

В соответствии с ГОСТ 8.195-2013, средние квадратические отклонения результатов (СПЭЯ, СПСИ, СПЭО) не должны превышать значения приведенные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 средние квадратические отклонения результатов (СПЭЯ, СПСИ, СПЭО)

Длина излучения, мкм	волны	Средние квадратические отклонения результатов сличений $\frac{\Delta B_\lambda}{B_\lambda}$ вторичных эталонов	Относительная погрешность вторичных эталонов, $1 \cdot 10^{-2}$ 1-ого разряда
0,2		3,0	8,0
0,22		2,5	5,0
0,25		2,0	4,0
0,5		0,6	1,5
1,0		0,5	1,8
2,5		1,0	3,0

Для вторичных эталонов малых уровней в диапазоне $5 \cdot 10^{-11} \left[\frac{Bm}{M^2} \right] \dots 5 \cdot 10^{-7} \left[\frac{Bm}{M^2} \right]$ и спектрального участка (0,35 ... 1,1) мкм. Средние квадратические отклонения не должны превышать $(1,5 \dots 3,0) \cdot 10^{-2}$ [10].

Полагаем, что температура тела накала при токе $I=25$ А (эталонной лампы типа ТРУ 1100-2350 № 117) составляет 2100 К, допускаемые средние квадратические погрешности соответствующие вторичному эталону для спектрального диапазона (0,2 ... 1,3) мкм, составляют $(1,5 \dots 3,0) \cdot 10^{-2}$.

Для получения допускаемых отклонений на спектральном диапазоне (0,2 ... 1,3) мкм, построим зависимость в соответствии таблицы 2.1.

Зависимость, представлена на рисунке 2.1.

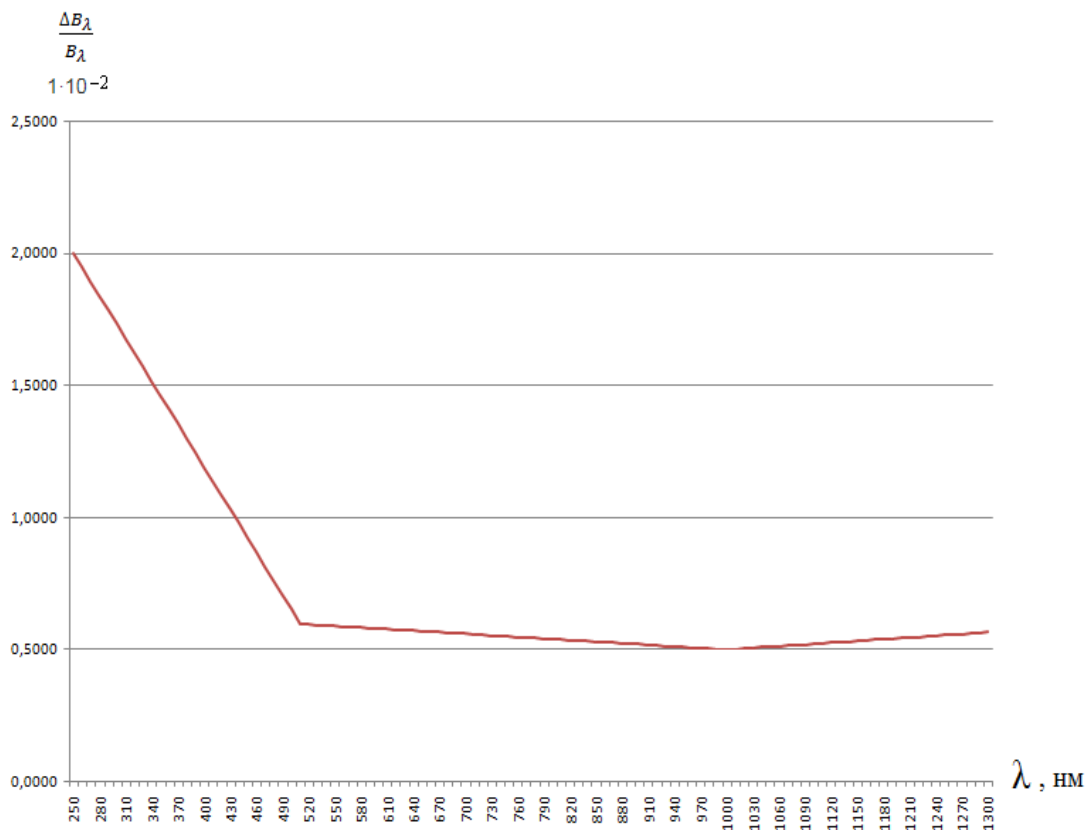


Рисунок 2.1 – зависимость средних квадратических отклонений результатов сличений $\frac{\Delta B_\lambda}{B_\lambda}$ вторичных эталонов от длины волны.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						43
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

Экстраполировав зависимость, представленную на рисунке 2.1, получим значения средних квадратических отклонений результатов сличений $\frac{\Delta B_\lambda}{B_\lambda}$ вторичных эталонов для длин волн, представленных в таблице 2.2.

Таблица 2.2 Средние квадратические отклонения результатов сличений $\frac{\Delta B_\lambda}{B_\lambda}$ вторичных эталонов

Длина волны излучения, мкм	$\frac{\Delta B_\lambda}{B_\lambda}$ вторичных эталонов, $1 \cdot 10^{-2}$
0.28	1.83
0.36	1.408
0.46	0.87
0.5	0.65
0.56	0.58
0.66	0.56
0.76	0.54
0.86	0.52
0.96	0.508
1	0.5
1.06	0.51
1.16	0.53
1.22	0.54
1.3	0.57

Подставим данные таблицы 2. в формулу (2.6):

Откуда следует, что отклонения температуры накала, например, для $\lambda=0,28$ мкм составляет:

$$\Delta T = 1.83 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{2.8 \cdot 10^{-7} \cdot 2100^2}{1.439 \cdot 10^{-2}} = 1.57 \text{ K}$$

Рассчитаем допускаемые отклонения температуры накала, для вторичных эталонов, в зависимости от длины волны излучения, представленных в таблице 5, по формуле (2.6). Результат представлен в таблице 2.3:

Таблица 2.3 отклонения температуры накала для всех длин волн.

Длина излучения, мкм	волны	$\frac{\Delta B_\lambda}{B_\lambda}$ вторичных эталонов, $1 \cdot 10^{-2}$	Отклонения температуры накала $\Delta T, \text{ K}$
0.28		1.83	1.57
0.36		1.408	1.553
0.46		0.87	1.226
0.5		0.65	0.996
0.56		0.58	0.995
0.66		0.56	1.133
0.76		0.54	1.258
0.86		0.52	1.371
0.96		0.508	1.495
1		0.5	1.532
1.06		0.51	1.657
1.16		0.53	1.884
1.22		0.54	2.019
1.3		0.57	2.271

Таким образом, требуемое поддержание температуры в пределах (1,0...1,2) K, соответствует относительной погрешности:

$$\delta_T = \frac{1,0}{2100} = 0,00047(0,047\%)$$

Из расчетов следует, что поддержание температуры в пределах (1,0...1,2) К, будет формировать погрешность в 0,047%, это означает, что погрешность очень мала и требования к аппаратуре, обеспечивающих стабильность температуры комплекса должны быть очень высокими.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						46
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

3 МАТРИЦА ЦИФРОВОГО ФОТОАППАРАТА. RAW-ФОРМАТ И RAW-КОНВЕРТОР. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО ФОТОАППАРАТА.

3.1 Матрица цифрового фотоаппарата.

Полупроводники, как известно, делятся на полупроводники n-типа и p-типа. В полупроводнике n-типа имеется избыток свободных электронов, а в полупроводнике p-типа избыток положительных зарядов, «дырок» (а следовательно недостаток электронов). На взаимодействии таких двух типов полупроводников и основана вся микроэлектроника.

ПЗС-матрицы цифрового фотоаппарата

Элемент ПЗС-матрицы цифрового фотоаппарата устроен следующим образом, рисунок 3.1:

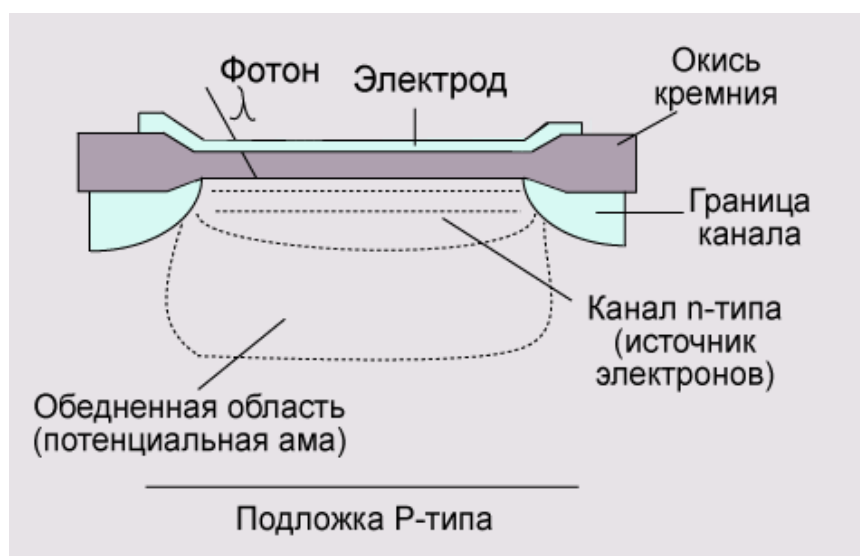


Рисунок 3.1 – ПЗС-матрицы цифрового фотоаппарата

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						47
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

ПЗС-элемент или прибор с зарядовой связью, в английской транскрипции: charge-coupled-device – CCD, представляет собой МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) конденсатор. Он состоит из подложки р-типа — слоя кремния, изолятора из двуокиси кремния и пластин-электродов. При подаче на один из электродов положительного потенциала, под ним образуется зона обедненная основными носителями — дырками, так как они оттесняются электрическим полем от электрода вглубь подложки. Таким образом под данным электродом образуется потенциальная яма, то есть энергетическая зона благоприятная для перемещения в нее неосновных носителей – электронов. В этой яме накапливается отрицательный заряд. Он может храниться в данной яме достаточно долго из-за отсутствия в ней дырок и, следовательно, причин для рекомбинации электронов.

В светочувствительных матрицах электродами являются пленки поликристаллического кремния, прозрачного в видимой области спектра.

3.2 RAW – формат

RAW — формат цифровых файлов изображения, содержащий необработанные данные об электрических сигналах с фотоматрицы цифрового фотоаппарата, цифровой кинокамеры, а также сканеров неподвижных изображений или киноплёнки.

В таких файлах содержится информация, полученная непосредственно с АЦП об электрических сигналах матрицы, не имеющая какой-либо общепринятой спецификации (стандарта). Из-за технических особенностей матриц и АЦП разных производителей всеобщего стандарта RAW не существует, и файлы с разных устройств отличаются друг от друга. Поэтому их чтение и конвертация требуют специальных приложений, часто непригодных для работы с файлами RAW других производителей, и даже моделей камер тех же брендов. По этой же

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						48
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

причине расширение файла RAW может быть разным у разных типов фото- и видеоаппаратуры.

Файлы типа RAW иногда называют «цифровым негативом», поскольку они играют роль, похожую на роль негатива в аналоговых фотографии и кинематографе. Как фотографический, так и кионегатив не являются конечным изображением, но содержат всю необходимую информацию для его создания. Похожий смысл несёт и процесс конвертации файлов RAW, называемый в большинстве приложений «проявлением» (англ. *Development*), поскольку по аналогии с обработкой фотоматериалов, позволяет так или иначе интерпретировать заложенную в скрытом изображении информацию.

При конвертации сам файл RAW никак не изменяется, а служит исходным материалом для создания другого файла, пригодного для визуализации и печати. Однако, процесс приводит к необратимой потере информации, которая не может быть восстановлена из полученных таким образом файлов. Кроме того, файлы RAW при конвертации подвергаются дебайеризации для перевода монохромного массива данных в то или иное цветовое пространство. Конечный графический файл, пригодный для просмотра в графических редакторах, это «отпечаток» с «цифрового негатива», условия создания которого при конвертации можно изменять, как в процессе аналоговой фотопечати. Конвертация файлов RAW может происходить как встроенным в камеру штатным конвертером, генерирующим «на лету» снимки форматов TIFF или JPEG, так и после съёмки на внешнем компьютере. В первом случае исходные файлы RAW могут не сохраняться на карте памяти, поскольку занимают дополнительный объём.

Внутрикамерные настройки баланса белого, светочувствительности и стиля изображения являются ни чем иным, как регулировками встроенного конвертера. Поэтому при внешней конвертации на компьютере большинство этих настроек может быть изменено в любую сторону без потери качества изображения. При этом вместо выбора стиля изображения могут быть непосредственно настроены

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						49
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

яркость, контраст, цветовая насыщенность и контурная резкость. Выбранные во время съёмки установки баланса белого служат при преобразовании лишь в качестве настройки по умолчанию, поскольку файлы RAW сами по себе никак не интерпретируют цвет снятых объектов. Выбранную перед съёмкой цветовую температуру при конвертации файла можно поменять в любую сторону без каких-либо ограничений. Всё это позволяет получать изображение очень высокого качества даже в случае значительных ошибок в момент съёмки.

Так же, как и негатив фотоснимка или кинофильма, файлы RAW обладают большими фотографической широтой и глубиной цвета, чем конечные снимки. Это объясняется тем, что в этих файлах часто используются 12- или 14-битные цветовые пространства, способные сохранять значительно больше данных, чем общепринятые 8-битные изображения формата JPEG.

3.3 Разработка методики измерения и контроля температуры на основе цифрового фотоаппарат

3.3.1 Выбор длины волны для измерения температуры

Для определения яркостной температуры необходимо провести измерение яркости на одной длине волны. Выбор длины волны обусловлен возможностями детектора и спецификой измеряемого объекта. Современные цифровые аппараты имеют высокую чувствительность в видимой области спектра 400-700 нм. При измерениях не слишком высоких температур удобно выбирать длину в красном или ближнем ИК диапазоне, поскольку спектральная яркость АЧТ в этой области выше.

Однако при измерении температуры катодных пятен в разряде постоянного тока приходится проводить измерения сквозь прикатодную зону разряда. На рисунке 3.2 приведен спектр прикатодной области разряда в аргоне [14].

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						50
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

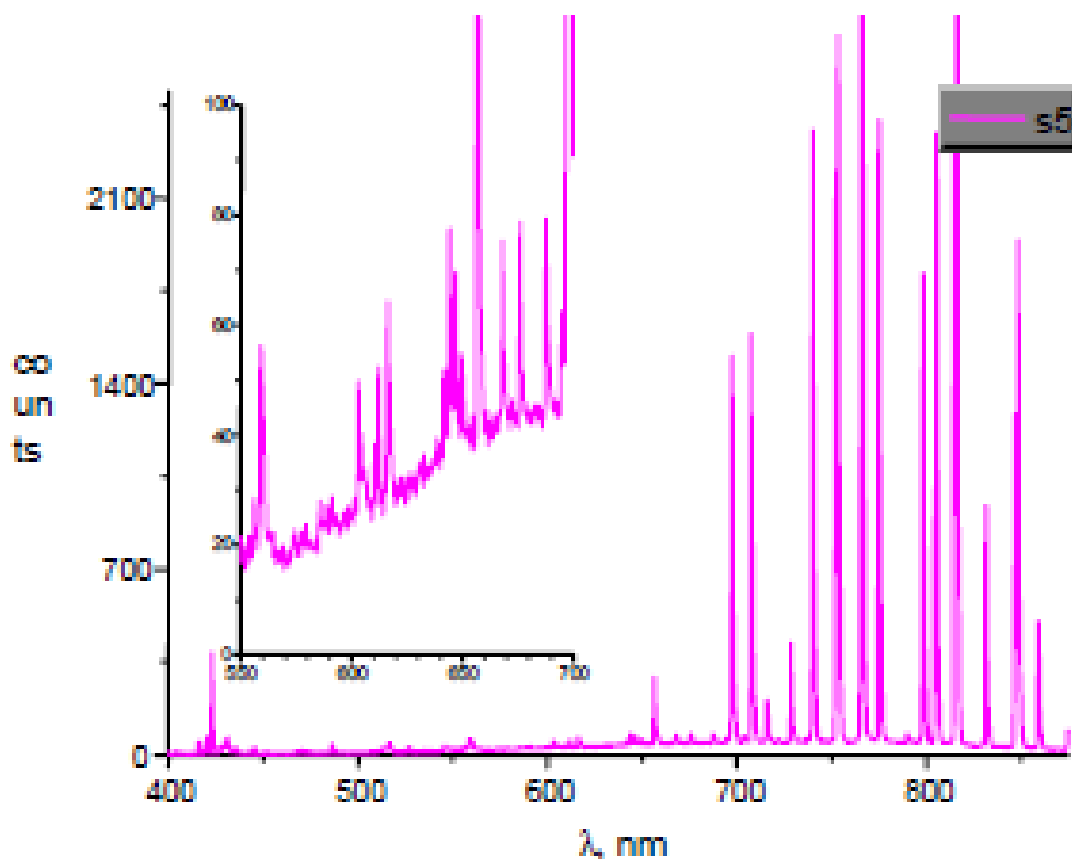


Рисунок 3.2 – Спектр прикатодной области разряда постоянного тока в аргоне. Давление 2 Торр, разрядный ток 300 мА.

Видно, что имеется значительное количество спектральных линий в области 500-700 нм на фоне теплового излучения катода. Имеется два участка спектра 563-601 нм и 619-639 нм, где излучение в спектральных линиях практически отсутствует. Для выделения нужного участка длин волн необходимо использовать узкополосный фильтр интерференционный фильтр с центром пропускания 596 нм, и шириной полосы (на половине высоты) 8 нм. Пропускание фильтра и спектр прикатодной области приведены на рисунке 3.3.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						51
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

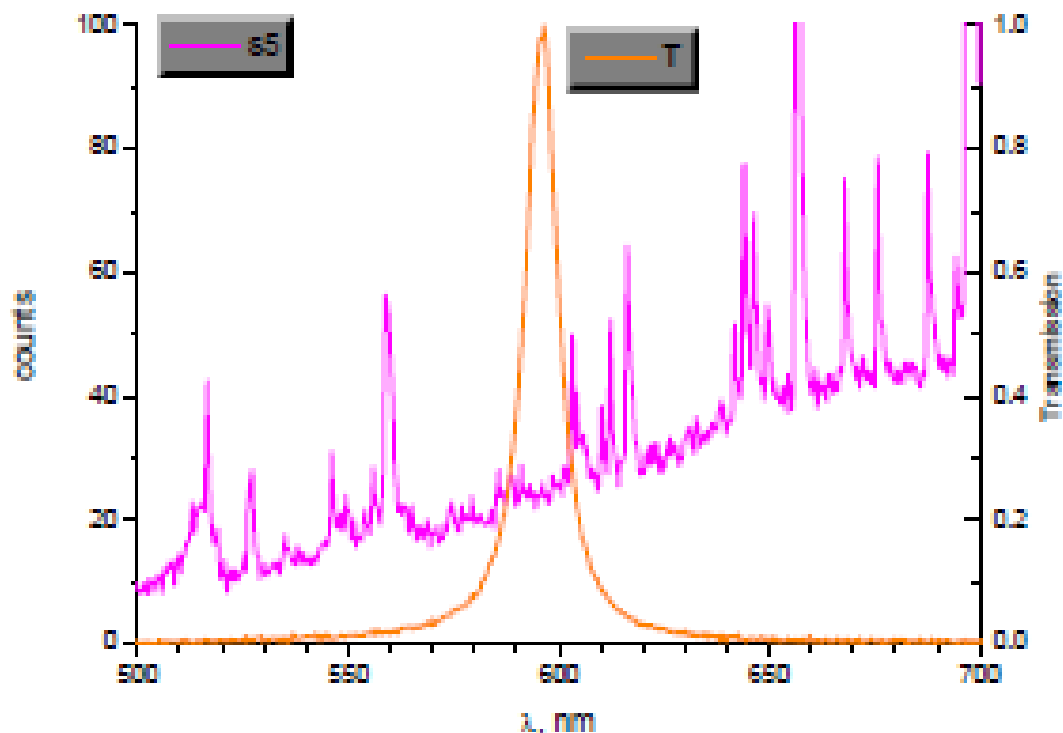


Рисунок 3.3 – Спектр прикатодной области разряда постоянного тока в аргоне в диапазоне 500-700 нм (s5) и пропускание интерференционного фильтра (Т).

Давление 2 Торр, разрядный ток 300 мА.

Интерференционный светофильтр закреплялся на стандартном бесцветном фильтре, после чего навинчивался на объектив фотокамеры [15].

3.3.2 Выбор цифровой камеры для измерений.

Для проведения измерений необходим фотоаппарат с возможностями полного ручного управления выдержкой диафрагмой, чувствительностью и наводкой на резкость. Так же необходимо иметь возможность смены объектива и крепления светофильтров на объектив. Кроме этого, фотоаппарат должен обеспечивать возможность записи исходных файлов (так называемый «raw» формат) без предварительной обработки в самом фотоаппарате.

3.3.3 Процедура обработки изображений.

Фотоаппарат переводится в ручной режим работы, отключаются функции предварительной обработки изображения (в частности шумоподавление). Объект фотографируется с записью файла в несжатом формате. Затем при помощи программного обеспечения RAW конвертера файл трансформировался в TIFF формат (R,G,B). Затем каждый канал этого файла записывается в виде отдельного файла в формате TIFF в шкале серого (8 бит). Таким образом выходной сигнал находится в пределах 0-255 для каждого канала [14].

3.3.4 Калибровка камеры.

Для калибровки фотокамеры можно использовать любой эталон АЧТ, для которого известна яркостная температура. Мы использовали откалиброванную светоизмерительную эталонную лампу ТРУ 1100-2350 № 117. Конструкция лампы представлена на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Конструкция эталонной лампы ТРУ 1100-2350 № 117

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						53
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

Свет в этой лампе испускается полоской вольфрама. На рисунке 3.5 стрелка показывает область из которой необходимо регистрировать свет при измерениях.



Рисунок 3.5 – Область, из которой необходимо регистрировать свет при измерениях

Зависимость температуры от тока для ТРУ 1100-2350 № 117 приведена на рисунке 3.6 [16].

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						54
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

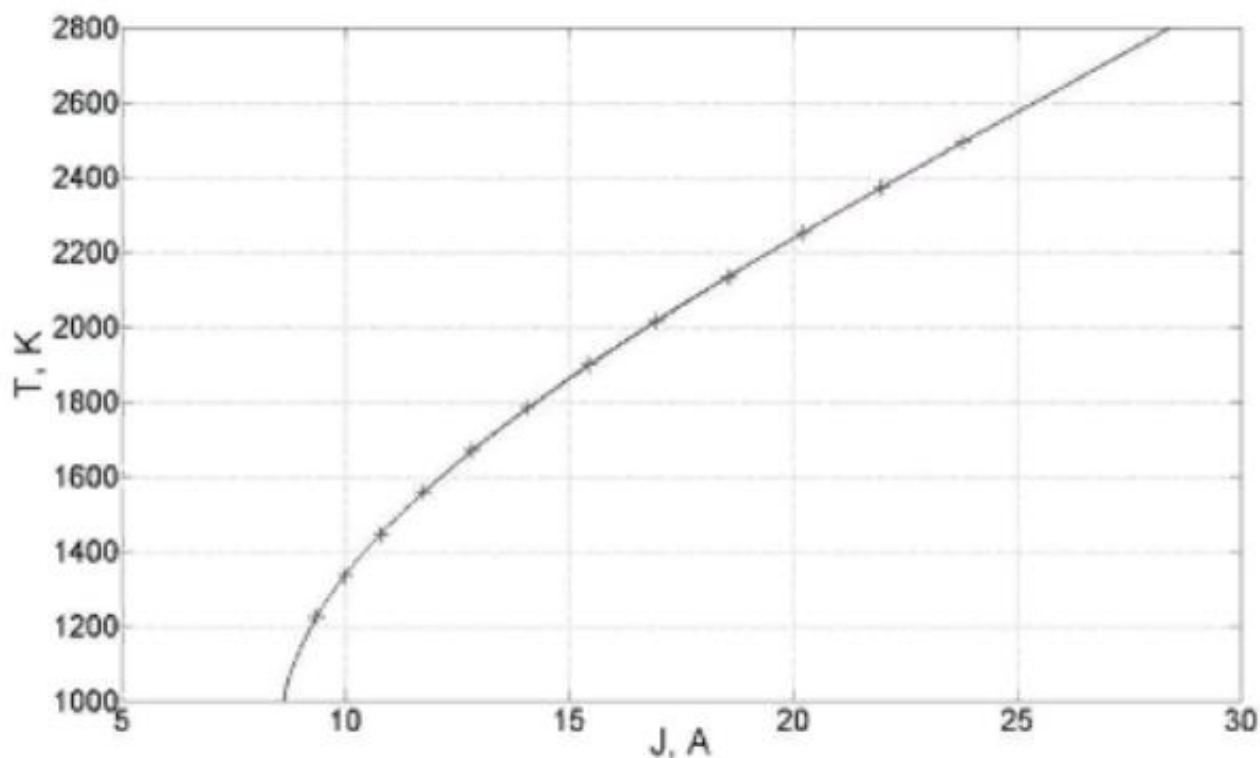


Рисунок 3.6 – Зависимость температуры от тока для ТРУ 1100-2350 № 117

Нестабильность тока при измерениях не превышала 0.01 А. Расчет яркостной температуры на длине волны 650 нм проводился по формуле:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_b} + \frac{\lambda_0}{c_2} \ln h(\lambda_0, T), \quad (3.1)$$

где T_b – яркостная температура тела;

λ_0 – длина волны;

T – температура, К;

Для калибровки фотокамеры камеры можно использовать любой эталон АЧТ, для которого известна яркостная температура на определенной длине волны.

Процедура калибровки фотокамеры состоит в следующем:

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						55
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

1. Включить режим “MANUEL” на фотоаппарате. Установить следующие параметры: ISO, выдержку, диафрагму, тип файла - RAW.
2. Установить интерференционный фильтр на объектив фотоаппарата.
3. Установить камеру на оптический рельс.
4. Установить необходимое расстояние до объекта на объективе фотоаппарата.
5. Получить резкое изображение светоизмерительной лампы (СИЛ) путем изменения расстояния между лампой и фотоаппаратом.
6. Включить СИЛ в соответствии с инструкцией.
7. Сделать фотографии СИЛ при различных температурах (токах).
8. Открыть файлы с фотографиями СИЛ, вычислить средние интенсивности центральной части светящейся полоски СИЛ. В наших экспериментах использовалась квадратная область размером 40x40 точек, рисунок 3.7.

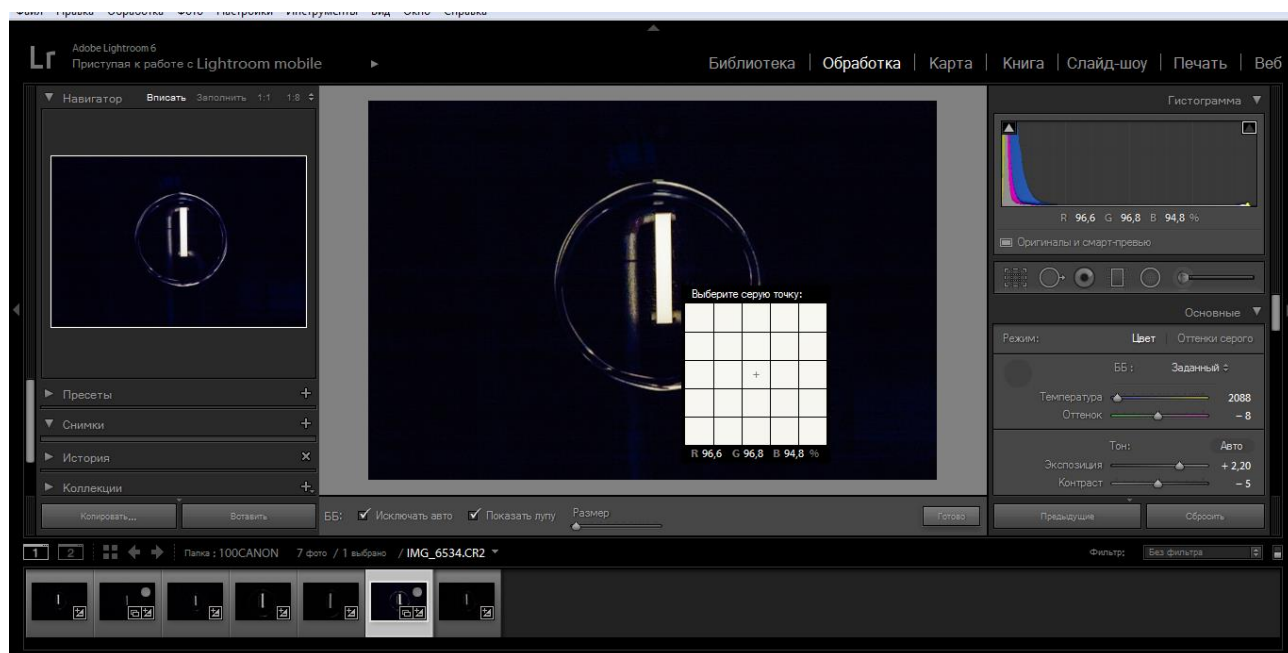


Рисунок 3.7 – Изображение эталонной лампы в RAW конвертере Lightroom

Увеличим изображение ленты накаливания эталонной лампы, представим на рисунке 3.8.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						56
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		



Рисунок 3.8 – Изображение ленты накаливания эталонной лампы

Воспользовавшись инструментами RAW конвертера, найдем температуру ленты накала.

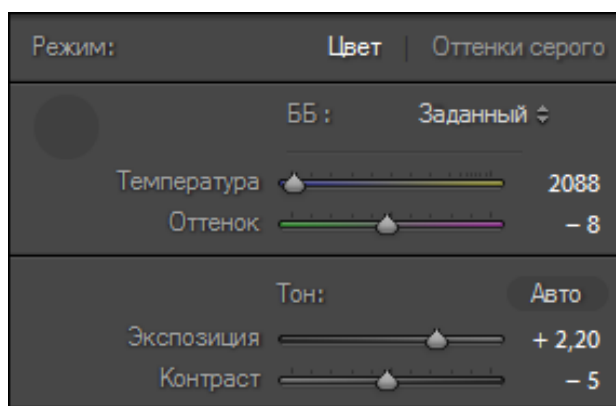


Рисунок 3.9 – Результат полученной температуры в RAW конвертере

Исходя из результатов работы RAW конвертера, получим, что температура накала ленты эталонной лампы ТРУ 1100-2350 № 117, равна $T=2088$ К.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						57
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

3.3.5 Оценка ошибок измерения.

Погрешности при измерении температуры этим методом можно разделить на три части: систематические погрешности метода яркостной пирометрии, погрешности связанные с калибровкой камеры и непосредственно погрешности измерений.

Систематические погрешности оценить наиболее сложно. К этим погрешностям можно отнести следующие: погрешность связанная с коэффициентом серости (в наших измерениях он неизвестен), погрешность связанная с излучением катода не как серого тела (сюда входит в частности подсветка от прикатодных зон при работе разряда). Влияние этих факторов на результаты измерений мы рассмотрим ниже. Погрешности при измерениях связаны с неточной установкой камеры, шумами объекта измерений, шумами CCD матрицы.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						58
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛА НАКАЛА ЭТАЛОННОЙ ЛАМПЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ КАЛИБРОВКИ В ЕДИНИЦАХ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ

4.1 Термометрия по тепловому излучению

Широко распространенным методом измерения температур является радиационная термометрия, основанная на регистрации теплового излучения нагретых объектов. Высокие температуры можно измерять по оптическому излучению, используя свойства функции Планка, описывающей тепловой (температурный) спектр абсолютно черного тела (АЧТ). Универсальность метода проявляется в том, что возможность измерения температуры не зависит от фазового состояния вещества и его химического состава, от формы объекта и расстояния до него [7].

Спектральная интенсивность теплового излучения черного тела описывается формулой Планка:

$$I = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}, \quad (4.1)$$

где $C_1 = 3.7413 \cdot 10^{-16}$ Вт·м²;

$C_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2}$ м·К;

λ – длина волны.

На рисунке 4.1 показаны спектры теплового излучения при температурах черного тела от 500 до 8000 К. Определение температуры по тепловому излучению чаще всего проводят в инфракрасном диапазоне на длинах волн 8-14 мкм и 3-5 мкм (в окнах прозрачности атмосферы), а также в области видимого света на длине волны 0,65 мкм, иногда используется дополнительная длина волны

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						59
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

(например, 0,55 или 0,48 мкм, этот выбор зависит от особенностей объекта). Наиболее существенные изменения интенсивности излучения с температурой происходят, как видно на рисунке 4.1, в коротковолновой области спектра.

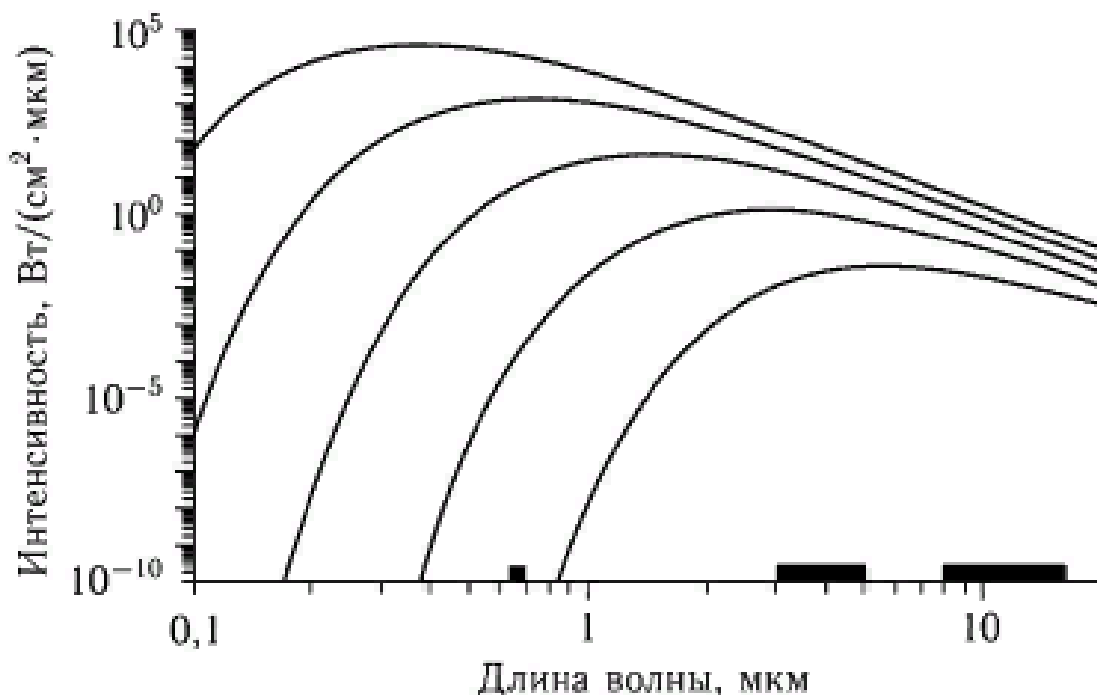


Рисунок 4.1 – Спектры теплового излучения черного тела при температурах 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 К (снизу вверх).

На оси абсцисс отмечены спектральные интервалы, которые чаще всего используются для измерения температуры в оптической пирометрии.

Максимум спектральной интенсивности находится на длине волны λ_{max} (мкм) $= 2898/T$ (К) (это соотношение называется законом смещения Вина). При увеличении температуры до $\sim 10^4$ К максимум сдвигается в ближний ультрафиолетовый диапазон, при $\sim 10^5$ К максимум находится в рентгеновском диапазоне (известна двойная звезда, спектр рентгеновского излучения которой подобен планковскому с температурой $T \approx 170000$ К) [6].

В случае, когда измеряется не спектральная интенсивность, а число квантов, испускаемое нагретой поверхностью единичной площади за единицу времени в единичном интервале спектра (квант/(см²*с*мкм)), максимум потока квантов соответствует длине волны λ_{\max} (мкм) $\approx 3670/T$ (К).

4.2 Закон смещения Вина

Закон смещения Вина — длина волны — на которую приходится максимум энергии в спектре равновесного излучения, обратно пропорциональна абсолютной температуре излучающего тела

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (4.2)$$

где λ_m — длина волны излучения с максимальной интенсивностью;

T — температура. Коэффициент $b = \frac{ch}{k\alpha}$ (где c — скорость света в вакууме, h — постоянная Планка;

k — постоянная Больцмана, $\alpha \approx 2,821439\dots$ — постоянная величина) называемый постоянной Вина, в Международной системе единиц (СИ) имеет значение 0,002898 м К [6].

Смещение длины волны в зависимости от температуры хорошо иллюстрируется экспериментальными кривыми, изображенными на рисунке 4.2.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						61
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

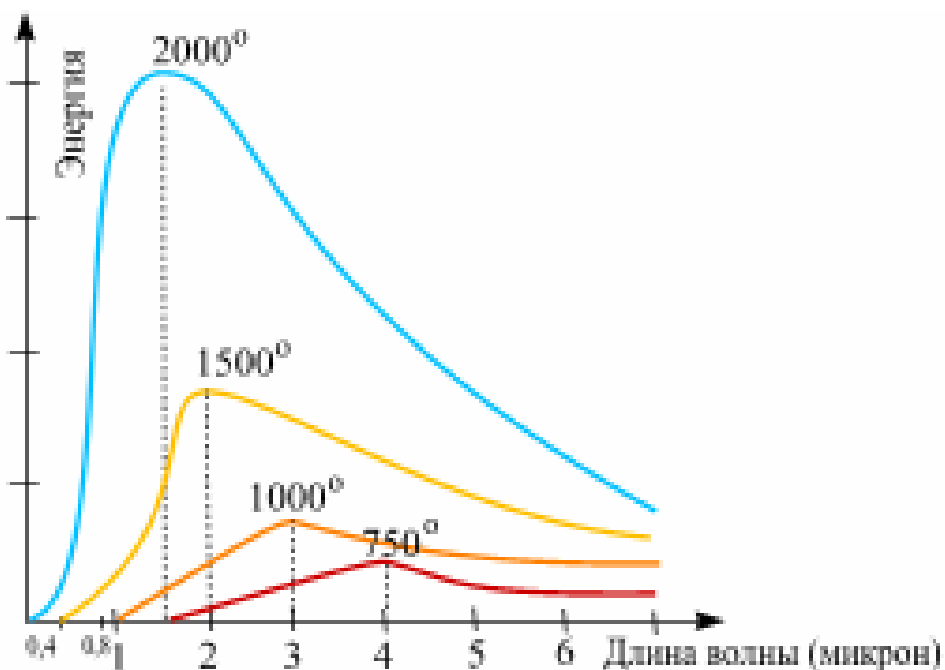


Рисунок 4.2 – Зависимость максимума излучения от абсолютной температуры

Длина волны, соответствующая максимуму излучения, обратно пропорциональна абсолютной температуре. Зная положение максимума излучения какой-либо излучающей поверхности (если она может быть принята за абсолютно черное тело) можно оценить ее температуру.

Выражение потому $\lambda * T = b$ называют законом смещения Вина, потому что оно показывает смещение положения максимума функции по мере возрастания температуры в область коротких длин волн. Закон Вина объясняет, почему при понижении температуры нагретых тел в их спектре все сильнее преобладает длинноволновое излучение (например, переход белого каления в красное при остывании металла).

В таблице 4.1, представлен протокол градуировки эталонной лампы типа ТРУ 1100-2350 № 117 по спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ).

Таблица 4.1. Протокол градуировки эталонной лампы типа ТРУ 1100-2350 № 117 по спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ).

Длина волны, м		СПЭЯ, Вт/м ³ *ср	
	$2,8 \cdot 10^{-7}$		$4,66 \cdot 10^7$
	$3 \cdot 10^{-7}$		$1,10 \cdot 10^8$
	$3,2 \cdot 10^{-7}$		$2,38 \cdot 10^8$
	$3,4 \cdot 10^{-7}$		$4,55 \cdot 10^8$
	$3,6 \cdot 10^{-7}$		$8,12 \cdot 10^8$
	$3,8 \cdot 10^{-7}$		$1,32 \cdot 10^9$
	$4 \cdot 10^{-7}$		$2,00 \cdot 10^9$
	$4,2 \cdot 10^{-7}$		$2,92 \cdot 10^9$
	$4,4 \cdot 10^{-7}$		$4,03 \cdot 10^9$
	$4,6 \cdot 10^{-7}$		$5,30 \cdot 10^9$
	$4,8 \cdot 10^{-7}$		$6,72 \cdot 10^9$
	$5 \cdot 10^{-7}$		$8,17 \cdot 10^9$
	$5,2 \cdot 10^{-7}$		$9,63 \cdot 10^9$
	$5,4 \cdot 10^{-7}$		$1,09 \cdot 10^{10}$
	$5,6 \cdot 10^{-7}$		$1,22 \cdot 10^{10}$
	$5,8 \cdot 10^{-7}$		$1,34 \cdot 10^{10}$
	$6 \cdot 10^{-7}$		$1,45 \cdot 10^{10}$
	$6,2 \cdot 10^{-7}$		$1,52 \cdot 10^{10}$
	$6,4 \cdot 10^{-7}$		$1,60 \cdot 10^{10}$
	$6,6 \cdot 10^{-7}$		$1,68 \cdot 10^{10}$
	$6,8 \cdot 10^{-7}$		$1,77 \cdot 10^{10}$
	$7 \cdot 10^{-7}$		$1,82 \cdot 10^{10}$
	$7,2 \cdot 10^{-7}$		$1,86 \cdot 10^{10}$
	$7,4 \cdot 10^{-7}$		$1,90 \cdot 10^{10}$

Продолжение таблицы 4.1

	$7,6 \cdot 10^{-7}$		$1,93 \cdot 10^{10}$
	$7,8 \cdot 10^{-7}$		$1,93 \cdot 10^{10}$
	$8 \cdot 10^{-7}$		$1,94 \cdot 10^{10}$
	$8,2 \cdot 10^{-7}$		$1,96 \cdot 10^{10}$
	$8,4 \cdot 10^{-7}$		$1,99 \cdot 10^{10}$
	$8,6 \cdot 10^{-7}$		$2,05 \cdot 10^{10}$
	$8,8 \cdot 10^{-7}$		$2,12 \cdot 10^{10}$
	$9 \cdot 10^{-7}$		$2,19 \cdot 10^{10}$
	$9,2 \cdot 10^{-7}$		$2,25 \cdot 10^{10}$
	$9,4 \cdot 10^{-7}$		$2,31 \cdot 10^{10}$
	$9,6 \cdot 10^{-7}$		$2,35 \cdot 10^{10}$
	$9,8 \cdot 10^{-7}$		$2,35 \cdot 10^{10}$
	$10 \cdot 10^{-7}$		$2,36 \cdot 10^{10}$
	$10,2 \cdot 10^{-7}$		$2,34 \cdot 10^{10}$
	$10,4 \cdot 10^{-7}$		$2,33 \cdot 10^{10}$
	$10,6 \cdot 10^{-7}$		$2,30 \cdot 10^{10}$
	$10,8 \cdot 10^{-7}$		$2,30 \cdot 10^{10}$
	$11 \cdot 10^{-7}$		$2,27 \cdot 10^{10}$
	$11,2 \cdot 10^{-7}$		$2,22 \cdot 10^{10}$
	$11,4 \cdot 10^{-7}$		$2,17 \cdot 10^{10}$
	$11,6 \cdot 10^{-7}$		$2,10 \cdot 10^{10}$
	$11,8 \cdot 10^{-7}$		$2,04 \cdot 10^{10}$
	$12 \cdot 10^{-7}$		$1,98 \cdot 10^{10}$
	$12,2 \cdot 10^{-7}$		$1,92 \cdot 10^{10}$
	$12,4 \cdot 10^{-7}$		$1,86 \cdot 10^{10}$
	$12,6 \cdot 10^{-7}$		$1,80 \cdot 10^{10}$

Используя данные таблицы 4.1, построен график зависимости СПЭЯ, от длины волны, представленный на рисунке 23.

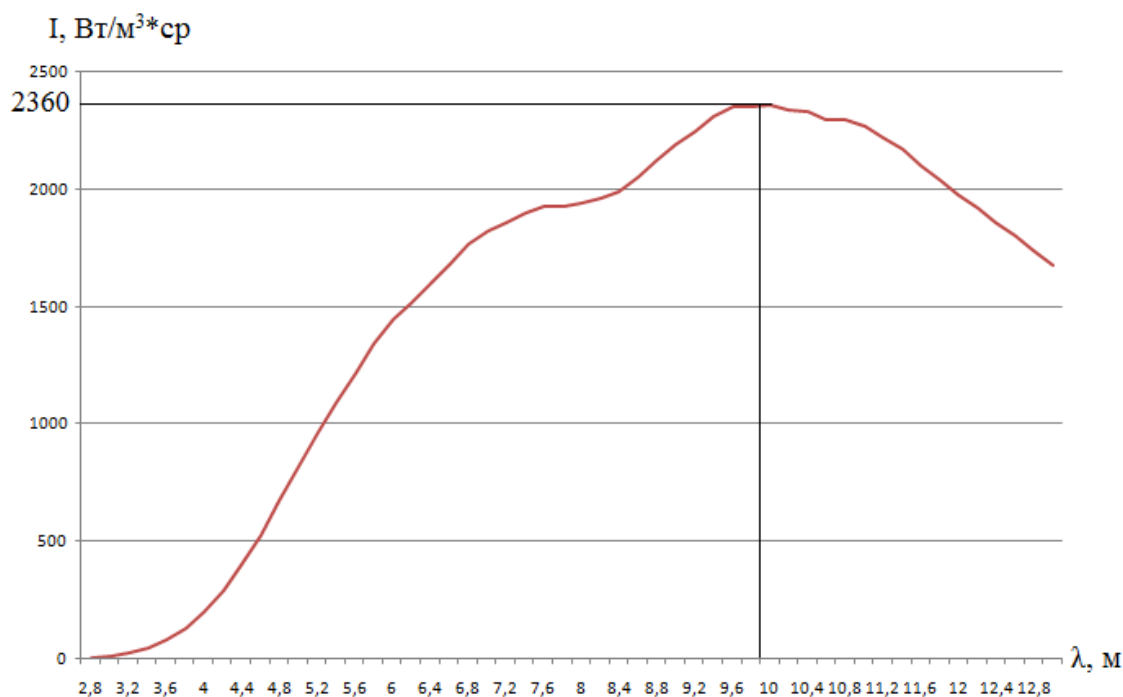


Рисунок 4.3 – график зависимости СПЭЯ, от длины волны.

Из рисунка 4.3 и таблицы 4.1, можно сделать вывод, что при максимуме спектральной плотности равной $I = 2,36 \cdot 10^{10}$ Вт/м³*ср, длина волны равна $\lambda = 10 \cdot 10^{-7}$ м. Следовательно, можно рассчитать примерную температуру излучения эталонной лампы, используя закон смещения Вина.

$$T = \frac{b}{\lambda} = \frac{2898}{1} = 2898 \text{ K}$$

Но, так как эталонная лампа ТРУ 1100-2350 № 117, не является АЧТ, данное значение температуры $T = 2898$ К, не может быть истинным.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						65
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

4.3 Определение температуры методом спектральная пирометрия.

Определение температуры данным методом основано на относительных измерениях интенсивности в широком спектре излучения светящегося объекта. Отличием от цветовой пирометрии является не только использование большого числа длин волн (фоточувствительные линейки содержат от 500 до 3600 пикселей), но и обязательная проверка подобия зарегистрированного спектра и спектра черного тела.

В области Вина имеются сильные и различные зависимости интенсивности излучения от длины волны и температуры, это различие проявляется в том, что параллельный перенос кривых вдоль оси ординат не приводит к их совпадению. Именно это свойство спектров излучения в области Вина позволяет с высокой точностью измерять температуру множества объектов методом спектральной пирометрии. Проводя аппроксимацию экспериментального спектра Планковской функцией, определяют температуру объекта.

Применяется так же другой способ нахождения температуры. Для расчетов воспользуемся формулой Вина:

$$I = \frac{\varepsilon \cdot C_1}{\pi} \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} \quad (4.3)$$

Откуда следует, что температура равна:

$$T = -\frac{C_2}{\lambda \cdot \ln\left(\frac{\pi \cdot I \cdot \lambda^5}{\varepsilon \cdot C_1}\right)} \quad (4.4)$$

где λ – длина волны;

T – температура исследуемого объекта;

ε – коэффициент излучения.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						66
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

Для каждой длины волны, есть свой коэффициент излучения ϵ . Этот коэффициент, показывает отношение энергии теплового излучения «серого тела» согласно Закону Стефана Больцмана, к излучению «абсолютно черного тела» при той же температуре.

В таблице 4.2, приведена зависимость коэффициента излучения вольфрама от длины волны [11].

Таблица 4.2 зависимость коэффициента излучения вольфрама от длины волны

λ	$2,8 \cdot 10^{-7}$	ϵ	0,473
	$3,6 \cdot 10^{-7}$		0,467
	$4,6 \cdot 10^{-7}$		0,453
	$5 \cdot 10^{-7}$		0,447
	$5,6 \cdot 10^{-7}$		0,440
	$6,6 \cdot 10^{-7}$		0,430
	$7,6 \cdot 10^{-7}$		0,412
	$8,6 \cdot 10^{-7}$		0,370
	$9,6 \cdot 10^{-7}$		0,348
	$10 \cdot 10^{-7}$		0,339
	$10,6 \cdot 10^{-7}$		0,332
	$11,6 \cdot 10^{-7}$		0,325
	$12,2 \cdot 10^{-7}$		0,320
	$13 \cdot 10^{-7}$		0,315

В случае серого тела, когда $\epsilon(\lambda) = \text{const}$, выражение (4.3) описывает прямую в координатах $x = \frac{c_2}{\lambda}$ и $y = \ln(\lambda^5 I)$. Наклон прямой определяется температурой. На рисунке 4.4, изображена прямая для нахождения температуры в виновских координатах:

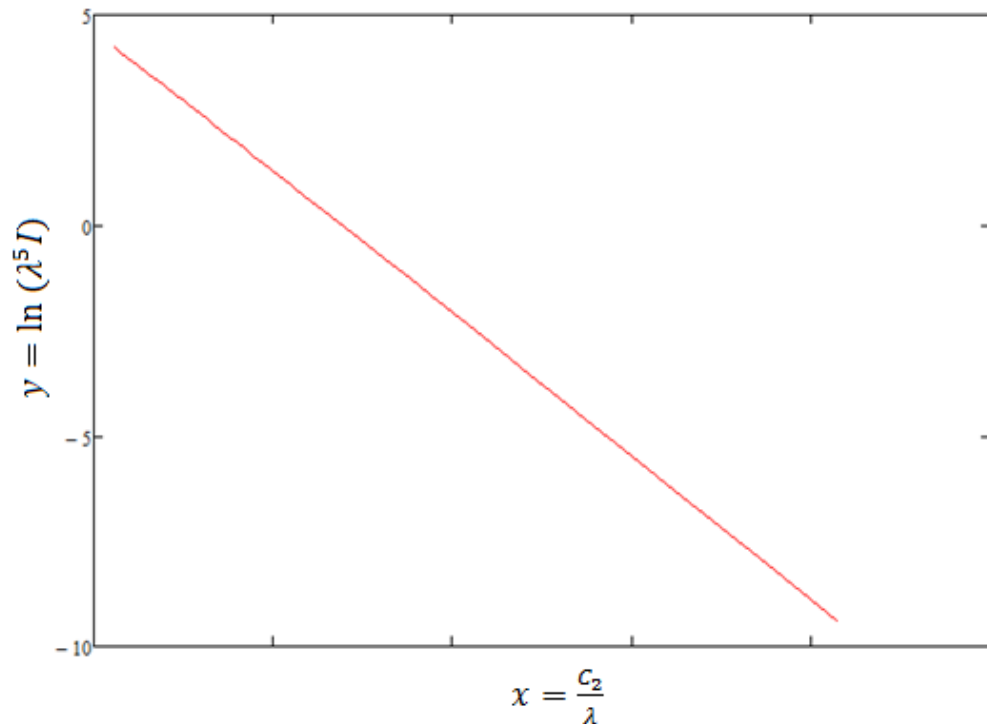


Рисунок 4.4 – Спектр черного тела в виновских координатах и интервале длин волн 280 – 1300 нм.

Из рисунка 4.4, следует, что наклон прямой определяется температурой равной 2098 К.

Приемники с переносом заряда регистрируют не интенсивность света (Вт/м^2), а полное число фотоэлектронов за время накопления сигнала Δt . Полное число электронов (N) в каждом пикселе связано с интенсивностью в выражении (4.4) соотношением $I\Delta t = N(h\nu)$, где $h\nu$ – энергия кванта, h – постоянная Планка, частота $\nu = c/\lambda$, где c – скорость света. Поэтому формула Планка для числа квантов примет вид:

$$N = C_1 \frac{\Delta t}{hc} \lambda^{-4} \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}. \quad (4.6)$$

Выражение 4.4 примет вид:

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						68
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

$$\ln(\lambda^4 N) - \ln\left(\frac{\varepsilon C_1 \Delta t}{hc}\right) = -\frac{C_2}{\lambda T}. \quad (4.7)$$

При этом спрямление планковского спектра происходит в координатах $x = \frac{C_2}{\lambda}$ и $y = \ln(\lambda^4 N)$.

Построив экспериментальный спектр в виновских координатах (x,y), можно определить температуру объекта без привлечения гипотез о величине коэффициента излучения. Влияние коэффициента излучения проявляется лишь в параллельном переносе прямой оси ординат, но наклон остается неизменным. Встречаются оба варианта построения графика: либо с $y = \ln(\lambda^5 I)$, либо $y = \ln(\lambda^4 N)$, в зависимости от того, какой фотоприемник применяется для регистрации света, и как проводилась калибровка. При использовании фотоприемников с токовым сигналом (ФЭУ, фотодиод) применяется первый вариант. Он же применяется для расчетных тепловых спектров.

Построение спектра в виновских координатах имеет преимущества перед подгонкой спектра с помощью планковской функции. В первом случае отчетливо видны отклонения спектра от прямолинейности, обусловленные особенностями исследуемого объекта.

Если имеется спектральная зависимость коэффициента излучения $\varepsilon(\lambda)$, ее влияние на наклон зависимости $y(x)$ проявляется лишь логарифмически, то есть намного слабее, чем $I(\lambda)$. Это особенности области Вина, где интенсивность излучения экспоненциально зависит от температуры. Влияние зависимости $\varepsilon(\lambda)$ на результат измерения температуры снижается при переходе в коротковолновую область спектра.

Таким образом, если в спектре излучения объекта имеются спектральные участки, где распределение интенсивности ведет себя подобно функции Планка, то есть спрямляется в соответствующих координатах, возможно определение

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						69
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

температуры по наклону полученного отрезка прямой. Если полученная зависимость заметно отклоняется от прямой, то есть проявляется зависимость $\ln \epsilon(\lambda)$, приближенное определение температуры необходимо проводить на коротковолновом участке графика, при этом погрешность уменьшается с уменьшением длин волн:

$$\frac{\Delta T}{T} = \left(\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \right) \left(\frac{C_2}{\lambda T} \right)^{-1}. \quad (4.8)$$

Поскольку для определения температуры необходимо регистрировать лишь относительную интенсивность излучения на разных длинах волн, геометрические факторы, такие как: размеры объекта, расстояние до него, не влияют на измерения.

В пирометрии отношения температуры определяют, основываясь на гипотезе об отношении коэффициентов излучения на двух длинах волн.

Отличаем спектральной пирометрии от пирометрии отношения является то, что априорная гипотеза об отношении ϵ_1 / ϵ_2 отсутствует, в подобие регистрируемого спектра и спектра черного тела выявляется в эксперименте по тому, что спектр в координатах Вина спрямляется с высокой точностью [2].

Для расчета температуры, воспользуемся данными из таблицы 4 и таблицы 5, подставим в формулу (4.5), выраженную из формулы Вина (4.4):

$$T = - \frac{1.4388 \cdot 10^{-2}}{2,8 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left(\frac{3,14 \cdot 4,66 \cdot 10^7 \cdot 2,8 \cdot 10^5}{0,473 \cdot 3,7413 \cdot 10^{-16}} \right)} = 2522 \text{ K}$$

Рассчитаем температуру для всех длин волн, представленных в таблице 5, затем полученные результаты занесем в таблицу 4.3.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						70
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

Таблица 4.3 Расчетные величины температуры исследуемого объекта с учетом спектральных коэффициентов излучения вольфрама.

Температура исследуемого объекта	
T [K]	2522
	2460
	2385
	2349
	2281
	2158
	2055
	1985
	1951
	1932
	1896
	1830
	1787
	1729

Из полученных результатов теоретического расчета температуры эталонной лампы: типа ТРУ 1100-2350 № 117, найдем среднее арифметическое, соответственно усредненную температуру наиболее близкую истинной температуре ленты лампы.

$$T_{\text{cp}} = \frac{T_{\lambda_1} + T_{\lambda_2} + \dots + T_{\lambda_n}}{n} \quad (4.9)$$

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						71
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

Из формулы (4.9) и результатов температуры из таблицы 4.3 получим, истинную температуру ленты накала эталонной лампы: типа ТРУ 1100-2350 № 117.

$$T_{cp} = \frac{2522 + 2460 + \dots + 1729}{14} = 2094 \text{ K}$$

Рассчитаем относительную погрешность по рассчитанным значениям температуры тела накала эталонной лампы ТРУ 1100-2350 № 117 к значению температуры, со снимка полученную в RAW конвертере

$$\delta = \frac{2094 - 2088}{2088} * 100 = 0,28\%$$

Из расчетов следует, что полученное значение температуры, со снимка ленты накала эталонной лампы ТРУ 1100-2350 № 117 в RAW конвертере и значение рассчитанное из значений СПЭЯ и длины волны, будут формировать погрешность в 0,28%, это означает, что использование цифрового фотоаппарата возможно для контроля и измерения температуры объектов.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						72
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе, был рассмотрен метод спектральной пирометрии и на его основе разработана методика использования в качестве приемника излучения и спектрального анализатора цифрового фотоаппарата. Для контроля эталонного излучателя, то есть для эталонной лампы типа ТРУ 1100-2350 № 117, произведена оценка влияния изменения температуры тела накала на величину спектральной плотности энергетической яркости. Погрешность при расчете допускаемых отклонений температуры тела накала оказалась слишком мала, это означает, что требования к аппаратуре, обеспечивающих стабильность температуры комплекса должны быть очень высокими. Так же была разработана методика контроля и измерения температуры объекта в RAW конвертере. Была найдена температура тела накала эталонной ленты с помощью инструментов RAW конвертера и найдена теоретическая температура тела накала исходя из данных спектральной плотности энергетической яркости. Сравнив результаты найденных температур, рассчитал относительную погрешность, которая оказалась достаточно малой, соответственно это означает, что использование цифровых фотоаппаратов возможно для измерения и контроля температуры объекта.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						73
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Магунов, А.Н. Спектральная пирометрия / А.Н. Магунов. – М.: Физматлист, 2012. – 400 с.
- 2 Магунов, А.Н. Спектральная пирометрия / А.Н. Магунов. – М.: Физматлист, 2010. – 245 с.
- 3 Усачев, Ю.А. Оптико-электронные измерительные системы. Курс лекций. /Ю.А. Усачев. – Юж.-Урал. гос. ун-т, Каф. Информационно-измерительная техника; ЮУрГУ, 1999.
- 4 Энциклопедия по машиностроению XXL – <http://mash-xxl.info/info/608671/>
- 5 Поскачей, А.А. Оптико-электронные системы измерения температуры / А.А. Поскачей, Е.П. Чубаров. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
- 6 Магунов, А.Н. Спектральная пирометрия (обзор). / А.Н. Магунов // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 4. – С. 23.
- 7 Магунов, А.Н. Спектральная пирометрия: особенности, преимущества, ограничения. / А.Н. Магунов // Фотоника – 2012. – №1. – С.40-45
- 8 Геращенко, О.А. Температурные измерения. Справочник / О.А. Геращенко, А.Н. Гордов. – Киев: Наук. думка, 1989. – 704 с.
- 9 Криксунов, Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники / Л.З. Криксунов. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.
- 10 ГОСТ 8.195-2013 – Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения, спектральной плотности энергетической освещенности, силы излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн от 0,2 до 25,0 мкм.
- 11 Мейер, А. Ультрафиолетовое излучение / А. Мейер, Э. Зейтц. – ИЛ – 1952.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						74
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

12 Куликов, А.Н. Оценка диапазонов перестройки параметров разложения в телекамере на матрице ПЗС / А.Н. Куликов. – “Техника средств связи”, сер. “Техника телевидения” – 1985 – №4 – с. 47 – 54.

13 Гордов, А.Н. Основы температурных измерений / А.Н. Гордов, О.М. Жагулло, А.Г. Иванова. М.: Энергоатомиздат – 1992. – 303 с.

14 Ракчеева, Л.П. Измерение температуры нагретых тел с высоким пространственным разрешением с помощью цифрового фотоаппарата: метод. Рекомендации / сост.– Москва, 2009. – 18с.

15 Свет, Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур / Д.Я. Светю – М., Наука – 1982.

16 Ермаков, К. А. Система оптического контроля скорости и температуры частиц в технологиях газотермического напыления / К. А. Ермаков, А. В. Долматов, И. П. Гуляев. – Вестник Югорского государственного университета – 2014 – №2 – с. 56 – 68.

17 Давиденко, А.П. Возможность применения цифрового фотоаппарата в задачах световых измерений / А.П. Давиденко, А.Д. Купко, В.Н. Славков. – Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып. : Автоматика и приборостроение. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2011. – № 11. – С. 27-33.

18 Иордан, В.И. Калибровка оптико-электронного измерительного тракта спектрофотометра по спектрам эталонных источников излучения / В.И. Иордан, Д.И. Кобелев, А.А. Соловьев. – АГУ – 2010. – С. 181 – 186.

19 Латыев, Л.Н. Излучательные свойства твердых материалов / Л. Н. Латыев, В.А. Петров, В.Я. Чеховской. и др.. — М., 1974.

20 Борн, М. Основы Оптики / М. Борн, Э. Вольф; Пер. С Англ. - М.: Наука, - 1973. - 720 С.

					ИОУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						75
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		

21 Кондратов, В.Т. Избыточная пирометрия: базовые структуры средств измерений температуры при разных видах функции преобразовании измерительного канала / В.Т. Кондратов. – Институт кибернетики им. В.М. Глушкова, Г. Киев. 247с.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-295. ВКР	Лист
						76
Изм.	Лист	№	Подп.	Дата		