



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
Кафедра «Физическое и прикладное материаловедение»

Методические указания
к лабораторной работе
«Бесконтактный метод определения
температуры»
по дисциплине

**«Неразрушающие методы
контроля материалов»**



Авторы
Долгачев Ю. В.,
Пустовойт В. Н.

Ростов-на-Дону, 2019

Аннотация

Методические указания к лабораторной работе предназначены для бакалавров, магистров, специалистов очной формы обучения направления 22.03.01. «Материаловедение и технологии материалов»

Авторы



д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой
«Физическое и прикладное
материаловедение»
Пустовойт В.Н.



к.т.н., доцент кафедры
«Физическое и прикладное
материаловедение»
Долгачев Ю.В.





Оглавление

БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ...	4
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ	4
2. ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА ОПТИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРА.....	9
3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	13
4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА	15
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	15
Список литературы	17

БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Изучение законов теплового излучения и получение навыков работы с оптическим пирометром.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Среди различных видов излучения тепловое является самым универсальным. В отличие от других видов источником теплового излучения является внутренняя энергия тела, зависящая от температуры. Все тела, температура которых отлична от абсолютного нуля, являются источниками теплового излучения. По этой причине тепловое излучение было изучено исчерпывающим образом, а задача о распределении энергии в спектре абсолютно черного тела сыграла выдающуюся роль в развитии основных идей современной физики. Ее решение привело к открытию универсальной постоянной h и созданию квантовой механики.

Законы излучения абсолютно черного тела находят важное применение при измерении высоких температур, начиная приблизительно с 600°C . Выше 2600°C температуру, вообще измеряют только оптическим способом.

Приборы, служащие для определения температуры на основе измерений теплового излучения, носят название оптических *пирометров*, а область экспериментальной физики, разрабатывающая принципы измерения температуры оптическими методами, - оптической пирометрией.

Тепловое излучение нагретого тела может разными способами использоваться для измерения температуры. В данной работе применяется один из этих способов, имеющий наибольшее практическое применение. В основу описанного метода положено сравнение яркости нагретого тела с яркостью абсолютно черного тела в том же спектральном интервале. Под абсолютно черным телом понимается тело, которое поглощает всю падающую на него лучистую энергию. Такое идеальное тело в природе отсутствует.

Модель его может быть представлена в виде небольшого отверстия в замкнутой полости (рис.1). Излучение любой частоты, попав через это отверстие внутрь полости и претерпевая много-

кратные отражения, практически из полости не выйдет. Поэтому малое отверстие, как и "черное тело", поглощает все падающие на него лучи любой длины волны.

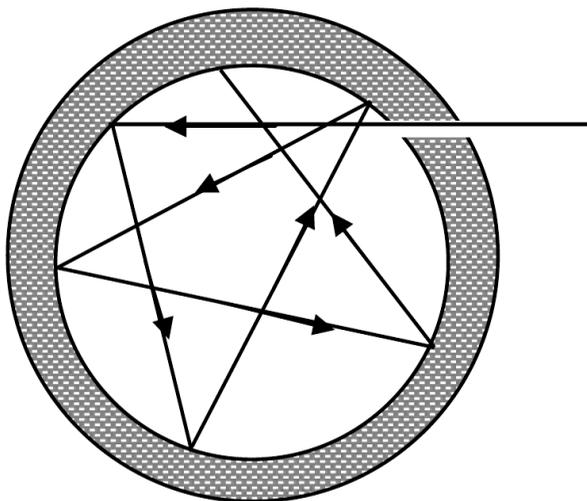


Рисунок 1 – Модель абсолютно черного тела.

Для такой модели абсолютно черного тела коэффициент поглощения можно принять равным единице. В дальнейшем все величины, относящиеся к абсолютно черному телу, будут отмечаться индексом "0". Все физические (реальные) тела по степени поглощения ими лучистой энергии отличаются от абсолютно черного тела и имеют коэффициент поглощения меньше единицы.

Интенсивность теплового излучения можно характеризовать величиной энергетической светимости R - количеством энергии, излучаемой при данной температуре единицей поверхности в единицу времени для всех длин волн от 0 до ∞ . Энергетическая светимость физических тел R отличается от энергетической светимости R_0 абсолютно черного тела при данной температуре T и может быть охарактеризована коэффициентом (степенью) черноты тела ε . Этот коэффициент черноты представляет собой дробь, определяющую ту часть энергии, которую составляет излучение данного тела от излучения абсолютно черного тела при той же температуре, т.е. $\varepsilon = R/R_0$.

Испускательной способностью тела r_λ будем называть энергетическую светимость, приходящуюся на узкий спектраль-

ный интервал $d\lambda$, отнесенную к ширине этого интервала $r_\lambda = dR/d\lambda$.

Обозначая через ε_λ - коэффициент черноты монохроматического излучения тела, аналогично предыдущему выражению, можно записать: $\varepsilon_\lambda = r_\lambda / r_{0\lambda}$.

Для всех физических тел $R < R_0$ и $r_\lambda < r_{0\lambda}$, т.е. $0 < \varepsilon < 1$ и $0 < \varepsilon_\lambda < 1$. Как R и r_λ , так и ε и ε_λ зависят от строения вещества и от состояния его поверхности.

Экспериментальные данные, полученные при изучении испускательной способности абсолютно черного тела, позволили построить кривые распределения энергии по длинам волн. Кривые, полученные для нескольких температур, приведены на рис.2, где по оси абсцисс отложены длины волн, по оси ординат - соответствующие значения испускательной способности.

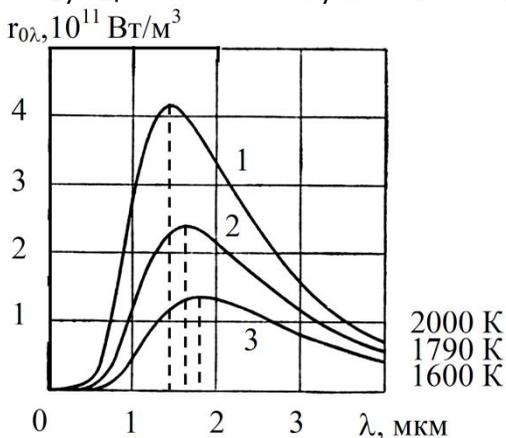


Рисунок 2 – распределение энергии в спектре абсолютно черного тела.

Как видно из рис.2, кривые имеют максимум, который при повышении температуры становится не только более резко выраженным, но и сдвигается в сторону более коротких длин волн. Общее количество энергии, излучаемой телом с единицы поверхности (оно выражается площадью под соответствующей кривой), быстро возрастает с повышением температуры. Увеличивается и количество энергии, приходящееся на единичный интервал длин

волн (испускающая способность). Например, все точки кривой 1, полученной для наибольшей температуры, лежат выше соответствующих точек кривых 2 и 3.

Неоднократно предпринимались попытки теоретически найти вид функции ϵ_0 для абсолютно черного тела, определяющей зависимость интенсивности монохроматического излучения от длины волны и температуры.

Все попытки, предпринятые в этом направлении, оставались безуспешными, пока не были приняты во внимание квантовые свойства процессов излучения и поглощения световой энергии. Анализируя причины неудач, немецкий ученый, известный физик М.Планк, пришел к выводу, что законы классической электродинамики не применимы к атомным излучателям; он допустил, что гармонический излучатель частотой ω может обладать запасом энергии, только кратным h , где h - универсальная постоянная (постоянная Планка), равная $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Из этого допущения, как следствие, вытекает, что как излучение, так и поглощение энергии атомом может происходить только порциями (квантами), величина которых так же определяется величиной постоянной Планка.

Закон Планка и выводы из него справедливы только для так называемого абсолютно черного тела, представляющего собой воображаемый идеальный излучатель, развивающий наибольшую возможную при данной температуре мощность излучения. Поскольку мощность излучения реального физического тела при некоторой температуре всегда меньше мощности излучения абсолютно черного тела при той же температуре, то, оценивая температуру по монохроматической яркости, нельзя определить действительную температуру реального физического тела. Вместо нее всегда определяется относительно меньшая, так называемая *яркостная* температура, т.е. температура, до которой надо нагреть абсолютно черное тело для того, чтобы его монохроматическая яркость была равна соответствующей фактической яркости реального физического тела. От яркостной можно перейти расчетным путем к действительной, истинной температуре, если известно соотношение монохроматических яркостей реального физического тела и абсолютно черного тела для выбранной длины волны и нужного интервала температуры, т.е. если известно отношение яркостей - равное коэффициенту черноты тела для данной длины волны ϵ_λ .

Существует соотношение между яркостной температурой T_j

физического тела и его действительной температурой T :

$$T = \frac{C \cdot T_{я}}{\lambda \cdot T_{я} \cdot \ln(\varepsilon_{\lambda}) + C} \quad (1)$$

где $C = \frac{h \cdot c}{k}$ ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана); λ – длина волны излучаемого света.

Так как яркость физического тела может зависеть от направления, то значения ε_{λ} определяются для направления, нормального к излучающей поверхности.

Из формулы (1) видно, что если для данного тела известно значение ε_{λ} , то по яркостной температуре $T_{я}$ можно найти истинную температуру T .

Определив по формуле (1) истинную температуру тела, можно вычислить энергию, теряемую единицей поверхности абсолютно черного тела в единицу времени при этой же температуре. В соответствии с законом Стефана-Больцмана:

$$R_0 = \sigma \cdot (T^4 - T_{окр}^4) \quad (2)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К), T – абсолютная температура тела, $T_{окр}$ – температура окружающей среды.

Слагаемое $\sigma T_{окр}^4$ определяет то количество энергии, которое поглощает единица поверхности абсолютно черного тела в единицу времени от окружающих тел, находящихся при температуре $T_{окр}$.

Мощность, затраченная на поддержание источника излучения в накаливаемом состоянии, определяет разность между излучаемой мощностью реального накаливаемого тела при температуре T и поглощаемой мощностью от окружающих тел, находящихся при температуре $T_{окр}$.

В соответствии с законом Кирхгоффа, отношение испускательной способности тела к его поглощательной способности равно испускательной способности абсолютно черного тела. В общем случае коэффициент черноты (поглощательная способность реального тела) зависит от длины волны излучения и от температуры тела. Тогда мощности излучения реального и абсолютно черного тел при одной и той же температуре будут связа-

ны следующим соотношением (если принять, что исследуемое тело является серым, т.е. для него $\varepsilon = \varepsilon_\lambda = const$ для всего спектрального диапазона):

$$\varepsilon_\lambda \cdot S \cdot R_0 = W \quad (3)$$

где ε_λ - коэффициент черноты тела для данной длины волны; S - общая поверхность нагретого тела; $W = I \cdot U$ - мощность, которая, как известно, является произведением силы тока на напряжение.

2. ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА ОПТИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРА

Для измерения температуры накаливаемого тела в работе используется оптический пирометр ОППИР-017 монохроматического излучения с исчезающей нитью переменного накала. Данный оптический пирометр имеет два предела измерений: $800^0 - 1400^0 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $1200^0 - 2000^0 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Оптический пирометр показывает действительную температуру только тогда, когда излучение накаливаемого тела, температура которого подлежит измерению, близко к излучению абсолютно черного тела. При остальных условиях, как говорилось ранее, пирометр измеряет температуру меньше действительной, т.е. яркостную температуру.

Оптическая и электрическая схемы ОППИР-017 даны на рис. 3. Оптический пирометр ОППИР-017 состоит из следующих основных элементов:

1) оптической системы, состоящей из объектива, окуляра, диафрагмы и монохроматического (красного) светофильтра, позволяющего рассматривать в лучах определенного цвета нить лампы на фоне изображения накаливаемого тела и поглощающих стекол;

2) пирометрической лампочки, включенной в электрическую схему последовательно с аккумулятором и реостатом для регулирования тока накала нити лампы и служащей эталоном измеряемой яркостной температуры;

3) электрического прибора, представляющего собой дифференциальный амперметр магнитоэлектрической системы с двумя рамками, из которых основная включена параллельно лампе, а дополнительная - навстречу основной и последовательно с лампой. Применение такой схемы позволяет уменьшить нерабочий участок шкалы до минимальной величины. Шкала

прибора градуируется в градусах яркостной температуры накаливаемого тела.

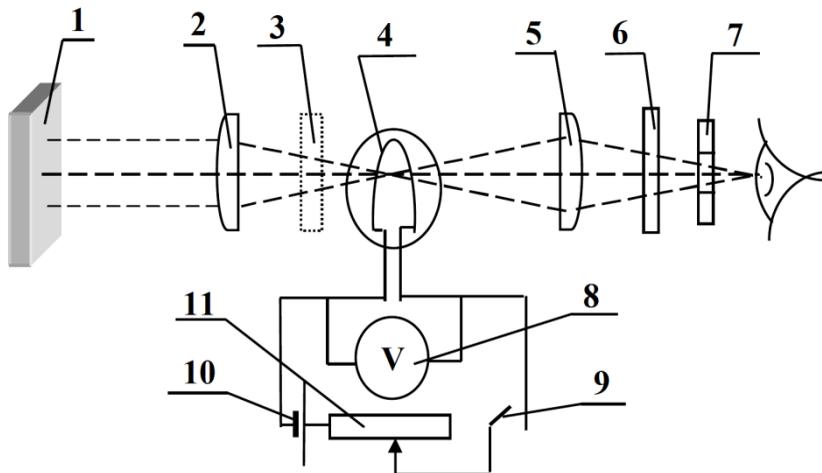


Рисунок 3 - Оптическая и электрическая схемы ОППИР-017: 1 - накаливаемое тело; 2 - объектив; 3 - ослабляющий светофильтр; 4 – пирометрическая лампочка; 5 - окуляр; 6 - монохроматический (красный) светофильтр; 7 - диафрагма; 8 - показывающий прибор; 9 - выключатель питания; 10 - аккумулятор; 11 - реостат.

Разбираемый оптический метод измерения температуры накаливаемых тел сводится к измерению их монохроматической яркости. Так как измерение абсолютного значения яркости представляется затруднительным, то в оптическом пирометре помещают эталон яркости, для которого заранее способом сравнения с искусственным абсолютно черным телом установлена зависимость яркости от температуры. С яркостью эталона сравнивают яркость тела, температура которого измеряется. В оптическом пирометре с исчезающей нитью таким эталоном служит яркость нити специальной электрической лампы накаливания, именуемой пирометрической (или фотометрической) лампочкой.

Оптическая система пирометра позволяет рассматривать нить лампочки на фоне изображения накаливаемого тела. Доводя яркость нити изменением тока накала до совпадения с яркостью накаливаемого тела, можно утверждать, что равны монохроматические яркости, то равны и температуры, а т.к. температура эталона всегда известна, то известна и измеряемая яркостная температура тела.

Момент достижения равенства монохроматических яркостей определяется на глаз с большой точностью, поскольку человеческий глаз является исключительно чувствительным ну-

левым индикатором контрастности излучения светящихся тел.

Достижение равенства яркостей, называемое фотометрическим равновесием, воспринимается наблюдателем как исчезновение границ нити пирометрической лампы на фоне изображения тела. По достижении фотометрического равновесия производится отсчет яркостной температуры объекта измерения. Эту температуру отсчитывают по шкале прибора, градуированной в градусах Цельсия.

Для длительного сохранения неизменности характеристик пирометрической лампочки температура ее нити не должна превышать 1400°C , поэтому при измерении температур свыше 1400°C надо ослабить яркость излучения тела, температура которого определяется, настолько, чтобы ослабленная яркость объекта измерения при его наивысшей возможной температуре не превосходила яркости, соответствующей 1400°C . Такое ослабление яркости тела достигается введением на пути между телом и лампочкой поглощающего стекла.

Пирометр ОППИР-017 состоит из следующих узлов (см. рис. 4). Корпус 9, в котором вмонтированы труба 3 объектива, внутри которой может скользить выдвижной тубус 2 с укрепленной в нем линзой объектива, служащей для создания изображения накаливаемого тела в плоскости нити пирометрической лампочки. На внешней стороне тубуса накручена гайка с накаткой, за которую берутся рукой при перемещении объектива. Перемещение тубуса объектива на 28 мм обеспечивает получение четкого изображения предмета, находящегося на расстоянии от объектива от 0,7 м до бесконечности.

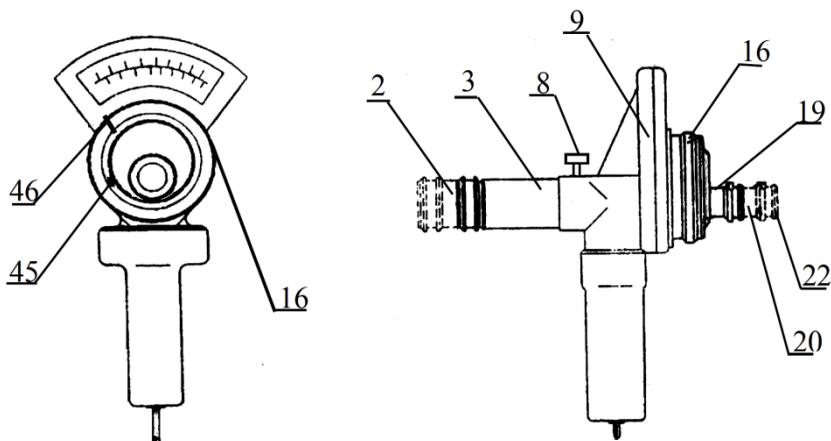


Рисунок 4 - Общий вид оптического пирометра ОППИР-017.

При измерении температур свыше 1400°C в поле зрения между

линзой объектива и пирометрической лампой поворотом рукоятки 8 вводится поглощающее стекло; при этом черная указательная точка на рукоятке 8 совпадает с одной из цветных (красной или голубой) точек на корпусе 9, указывающей, на каком пределе нужно производить отсчет температуры. Когда черная указательная точка на рукоятке 8 совпадает с голубой точкой на корпусе 9, отсчет следует производить на нижнем пределе измерений, в случае ее совпадения с красной точкой отсчет производится на верхнем пределе измерений.

На вертикальной стенке верхней части корпуса расположен доступный снаружи винт корректора установки на нуль стрелки электроизмерительного прибора.

В крышку корпуса вмонтирован кольцевой реостат для регулирования тока накала пирометрической лампочки. При повороте кольца 16 слева направо по направлению стрелки, нанесенной на кольцо, сопротивление реостата, введенное в цепь накала пирометрической лампочки, уменьшается. При повороте кольца 16 влево до упора, ограничивающего вращение кольца, контакт-щетка сходит со спирали сопротивления реостата, и цепь накала лампы разрывается.

В момент выключения тока, т.е. при крайнем левом положении кольца 16, отметка 45 (нуль) должна совпадать с аналогичной отметкой 46 на крышке корпуса.

Окулярная система служит для рассматривания в монохроматических лучах нити пирометрической лампочки на фоне изображения накаливаемого тела, температура которого измеряется. Окулярная система смонтирована в выдвижном тубусе 20 окуляра, перемещаемом в направляющей трубе 19, выполненной как одно целое с крышкой реостата. Для легкого перемещения тубуса 20 направляющая трубка внутри оклеена сукном. В тубусе окуляра установлены линза окуляра, монохроматический (красный) светофильтр, укрепленный в поворотной обойме 22, и входная диафрагма, за которой находится глаз наблюдателя при измерении температуры.

Электроизмерительный показывающий прибор, встроенный в пирометр, реагирует на изменение напряжения и тока пирометрической лампочки, которые зависят от сопротивления нити лампы, а, следовательно, от ее температуры.

Источником питания для пирометрической лампочки служат щелочные аккумуляторы, развивающие при последовательном соединении двух аккумуляторов напряжение от 1,6 до 2,0 вольт, или выпрямитель В-24. При подключении пирометра к источнику питания "+" соединяют с "+", а "-" соединяется с "-".

3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучите основные теоретические представления и устройство оптического пирометра.

2. Подать напряжение на исследуемую лампочку (или включить печь для нагрева исследуемого образца, в зависимости от указаний преподавателя).

3. Проверить, выключен ли пирометр. Черная отметка 45 на поворотном кольце 16 реостата должна находиться против такой же отметки 46 на крышке 15 корпуса. Если этого нет, довести влево до упора кольцо реостата 16. Примечание: Кольцо необходимо поворачивать слегка, т.к. иначе можно перевести щетку-контакт (находящуюся внутри прибора) за упор, изогнуть и вывести из строя.

4. Проверить установку стрелки не включенного показывающего прибора на нулевой отсчет шкалы. Если этого нет, с помощью отвертки установить стрелку на нулевую отметку шкалы поворотом в соответствующую сторону винта корректора, расположенного на вертикальной стенке корпуса 9.

5. Подключить пирометр к источнику питания, соблюдая полярность.

6. Поворотом кольца 16 реостата по часовой стрелке включить схему пирометра и довести накал нити пирометрической лампы приблизительно до 1400 °С (по показаниям встроенного показывающего прибора). Направить объектив пирометра на какую-нибудь неярко освещенную поверхность (лучше темную) и, приложив глаз к выходной диафрагме окуляра, медленно перемещать тубус окуляра до тех пор, пока не будет видна нить пирометрической лампы совершенно четко.

7. Поворотом обоймы 22 ввести в поле зрения монохроматический (красный) светофильтр, если только он не был уже введен в процессе работы.

8. В зависимости от предполагаемого значения измеряемой темпера-

туры выбрать предел измерения поворотом рукоятки 8.

9. Направить объектив пирометра на тело, температура которого под-

лежит измерению, и, приложив глаз к выходной диафрагме окуляра, медленно перемещать тубус 2 объектива до тех пор, пока наблюдатель не будет видеть изображение тела (перевернутое) совершенно четко одновременно с нитью пирометрической лампы.

10. Если в результате действий, указанных в п.9, размеры изображения

Неразрушающие методы контроля материалов

тела окажутся малы, то для того, чтобы было удобно рассматривать на нем изображение нити пирометрической лампы, как на фоне, следует совместить изображение исследуемого тела с верхней частью дуги пирометрической лампочки.

11. Изменяя яркость нити пирометрической лампы поворотом кольца

16 реостата, довести ее до того, чтобы «исчез» средний участок (вершина дуги) нити лампы на фоне изображения тела, температура которого измеряется.

Примечания:

11.1. Следует помнить, что поворот кольца 16 реостата по часовой стрелке увеличивает накал нити, а против часовой стрелки уменьшает его.

11.2. При повороте кольца 16 стрелка показывающего прибора сначала

уходит влево до упора, и после того, как температура нити лампы достигает рабочих температур, стрелка переходит на рабочую часть шкалы.

11.3. Для более точного фотометрирования рекомендуется кольцо 16

устанавливать в такое положение, при котором исчезает нить, подходя к нему повторно и поочередно от слишком малой ее яркости и от слишком большой. Нить кажется темной на относительно более светлом фоне при слишком малой ее яркости и светлой - на относительно более темном фоне при слишком большой яркости.

12. Отсчитать измеренную температуру по положению стрелки встроенного показывающего прибора (по шкале выбранного предела измерения).

13. Результаты занести в таблицу 1. Измерения проделать не менее 3 раз при одной температуре. Эксперимент повторить при трех разных температурах нагрева образца.

Таблица 1 – Результаты измерений и расчетов.

№	$T_n, ^\circ\text{C}$	Среднее значение T_n, K	Истинная T, K	Светимость, $R_0, \text{Вт/м}^2$	Сила тока, I, A	Напряжение, $U, \text{В}$	Мощность, $W, \text{Вт}$	Площадь излучаемой поверхности $S, \text{м}^2$
1								

2								
3								

14. Выключить пирометр поворотом кольца реостата против часовой стрелки. Отключить источник питания (аккумуляторную батарею или выпрямитель В-24).

15. Рассчитайте истинную температуру T по формуле (1) принимая, что длина волны $\lambda = 660$ нм, а коэффициент черноты тела $\varepsilon_{\lambda} = 0,43$ для вольфрамовой нити (в случае другого металла данный параметр найти по справочным данным).

16. Определите светимость R_0 вольфрамовой лампочки при истинной температуре по формуле (2).

17. Определите площадь поверхности раскаленной спирали S из формулы (3).

18. Составьте отчет о работе.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Цель работы.

Основные теоретические сведения о тепловом излучении.

Краткое описание устройства оптического пирометра.

Таблица 1 заполненная в соответствии с методическими указаниями и соответствующие расчеты.

Выводы на основании полученных результатов.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Что такое пирометр?

Опишите модель черного тела?

Сформулируйте законы излучения абсолютно черного тела?

Опишите распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела?

Что не могла объяснить классическая физика?

Что такое яркостная температура?

Что такое коэффициент яркости и коэффициент черноты тела?

Неразрушающие методы контроля материалов

В чем состоит основной смысл квантовой гипотезы Планка для теплового излучения?

В чем смысл закона Кирхгофа для теплового излучения?

Как устроен оптический пирометр, принцип его действия?

Каков порядок проведения измерения с помощью ОППИР-017?

Каковы возможности ОППИР-017?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калиниченко А.В., Уваров Н.В., Дойников В.В. Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам и автоматике. - М.: Инфра-Инженерия, 2017. - 564 с.
2. Сажин С.Г. Средства автоматического контроля технологических параметров. - Санкт-Петербург: Лань, 2014. - 368 с.
3. Нестерук Д.А., Вавилов В.П. Тепловой контроль и диагностика. - Томск: Томский политехнический университет, 2010. - 112 с.
4. Солоухин Р.И. Оптика и атомная физика. - М.: Наука, 1976, 454 с.