

5. Приведите соображения, подтверждающие, что между проводимостью фоторезистора и интенсивностью света, падающего на фоторезистор, существует пропорциональная зависимость.

6. Продумайте, как в данной работе оценить влияние на результат измерения постоянной Планка того факта, что светофильтр обладает конечным диапазоном частот пропускания.

7. Как изменится расчетная формула для постоянной Планка:

а) если нить накаливания лампочки считать абсолютно черным телом?

б) если считать, что вся подводимая к лампочке электрическая мощность идет на излучение света?

8. Какой вид принимает формула Планка для низких ($h\nu \ll kT$) и высоких ($h\nu \gg kT$) частот?

602. ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕТЫХ СВЕЯЩИХСЯ ТЕЛ ЯРКОСТНЫМ ПИРОМЕТРОМ

602.1. Цель работы

Ознакомиться с основными понятиями, количественными характеристиками и законами равновесного теплового излучения. Изучить методику измерения температуры вольфрама яркостным пирометром.

602.2. Разделы теории и эксперимента

Равновесное тепловое излучение. Излучательная и поглощательная способности нагретых тел. Законы Кирхгофа, Стефана – Больцмана, смещения Вина, формула Планка.

Оптическая пирометрия. Энергетические характеристики осветительных приборов. [1. Гл. 1, §1 – 7]; [2. Гл. 26, §197 – 201]

602.3. Приборы и принадлежности

Пирометр с исчезающей нитью, проекционная лампа накаливания, лабораторный блок питания.

602.4. Теоретическое введение

Наиболее распространенным в природе является свечение тел, обусловленное их нагреванием. Этот вид свечения называют тепловым (или температурным) излучением. Если окружить излучающее тело оболочкой с идеально отражающей поверхностью, то при длительном обмене энергией между телом и излучением, заполняющим оболочку, может возникнуть момент, после которого состояние системы тело – излучение будет равновесным.

Возникшее динамическое равновесие характеризуется тем, что количество излучаемой в единицу времени телом энергии будет равно количеству поглощаемой энергии за то же время.

Как показали эксперименты, излучательная $r(\lambda, T)$ (возможно второе название этой функции – спектральная плотность энергетической светимости) и поглощательная $A(\lambda, T)$ способности нагретых тел зависят от длины волны λ и абсолютной температуры T и оказываются различными для различных тел.

Количественная связь между этими функциями была установлена Кирхгофом и выражена законом: для произвольной частоты и температуры отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности одинаково для любых тел и равно излучательной способности абсолютно чёрного тела (под абсолютно черным телом Кирхгоф понимает тела, поглощательная способность которых постоянна $A(\lambda, T) = \alpha^*(\lambda, T) = 1$).

$$\frac{r(\lambda, T)}{A(\lambda, T)} = \frac{r^*(\lambda, T)}{\alpha^*(\lambda, T)} = r^*(\lambda, T), \quad (602.1)$$

где $r^*(\lambda, T)$ – универсальная функция Кирхгофа. Её аналитический вид удалось найти М. Планку после предположения, что излучение электромагнитной энергии происходит квантами (порциями)

$$r^*(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1 \right]}, \quad (602.2)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. Далее символ (*) будет относиться к абсолютно чёрному телу.

График зависимости излучательной (испускательной) способности абсолютно чёрного тела $r^*(\lambda, T)$ от длины волны в относительных единицах представлен на рис. 602.1 для температуры 2450 К (верхняя сплошная кривая). Здесь же для сравнения представлена кривая излучательной способности вольфрама $r(\lambda, T)$ для той же температуры, полученная экспериментально (нижняя сплошная кривая).

Пунктирная кривая, дающая отношение $a = r/r^*$, показывает, что относительное излучение вольфрама растёт по мере уменьшения длины волны. Это излучательное свойство вольфрама называют селективностью его излучения.

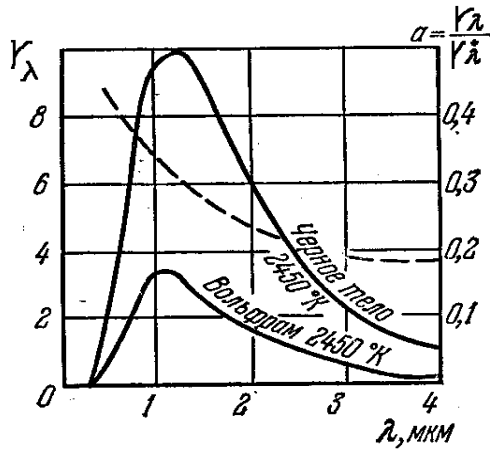


Рис. 602.1

Как видно из рис. 602.1, излучательная способность абсолютно чёрного тела имеет максимум, приходящийся на длину волны λ_m , определяемую из закона смещения Вина (закон получается из приравнивания нулю производной от выражения (602.2) по λ и последующего решения получающегося трансцендентного уравнения):

$$T\lambda_m = b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ мК}. \quad (602.3)$$

Значение максимума определяется из второго закона Вина, подставляя λ_m в (602.2):

$$r^*(\lambda_m, T) = a \cdot T^5, \quad (602.4)$$

где $a = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$.

Если проинтегрировать функцию Планка (602.2) по всем длинам волн, то получим закон Стефана – Больцмана, показывающий, как зависит энергетическая светимость абсолютно чёрного тела от температуры:

$$R^*(T) = \int_0^{\infty} r^*(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4, \quad (602.5)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана – Больцмана.

Поток лучистой энергии P_T (мощность теплового излучения), испускаемый нагретым телом, рассчитывается из соотношения

$$P_T = RS_0 = W/t, \quad (602.6)$$

где S_0 – площадь излучающей поверхности; R – энергетическая светимость нагретого тела; W – тепловая энергия, излучаемая за время t .

При излучении точечных (или сферически симметричных) тел в окружающее пространство остается неизменным полный испускаемый поток $\Phi = P_T$. Это приводит к тому, что на двух концентрических сферических поверхностях

$$\Phi = R_0 S_0 = R_1 S_1 = const. \quad (602.7)$$

Откуда

$$R_1 = R_0 \frac{S_0}{S_1} = R_0 \frac{r_0^2}{r_1^2},$$

где r_0 и r_1 – радиусы сферических поверхностей, на которых зафиксированы значения энергетической светимости R_0 и R_1 . Полученное соотношение указывает на то, что с удалением от точечного нагретого источника энергетическая светимость убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, отсчитываемого от центра источника. То же соотношение имеет место и для излучательной способности абсолютно чёрного тела, записанного для спектральной составляющей λ_0 :

$$r^*(\lambda_0, T_1) = r^*(\lambda_0, T_0) \frac{r_0^2}{r_1^2}. \quad (602.8)$$

Закон Стефана – Больцмана может быть обобщен и на нечёрные тела. Для этого энергетическую светимость $R(T)$ нечёрного тела определяют в виде

$$R(T) = \chi R^*(T) = \chi \sigma T^4, \quad (602.9)$$

где χ – коэффициент нечёрности тела, показывающий во сколько раз при заданной температуре нечёрное тело излучает

энергии меньше по сравнению с черным телом. Его значения заключены в пределах $0 \leq \chi \leq 1$.

602.5. Методика измерения температуры яркостным пирометром

Метод дистанционного определения температуры нагретого тела основывается на сравнении его яркости излучения с яркостью излучения абсолютно черного тела на одном и том же фиксированном узком участке спектра длин волн $\Delta\lambda$. Обычно используется участок, лежащий в окрестности $\lambda_0 = 0,65$ мкм (красная часть спектра). Участок обусловлен красным светофильтром, находящимся в пирометре.

Схема яркостного пирометра, называемого пирометром с исчезающей нитью, показана на рис. 602.2.

Пирометр состоит из оптической трубы 1 с объективом 2 и окуляром 3. Основной частью пирометра является фотометрическая лампочка 4, расположенная в фокусе объектива оптической трубы. Нить накала лампочки подключена к источнику питания 5 через реостат 6 и измерительный прибор амперметр 7. Между объективом 2 и лампочкой 4 помещен дымчатый светофильтр 8 для ослабления светового потока, проходящего через объектив при большой яркости источника S. Между окуляром 3 и лампочкой 4 помещён красный светофильтр 9, пропускающий длину волны $\lambda = 0,65$ мкм и позволяющий проводить измерения в монохроматическом свете.

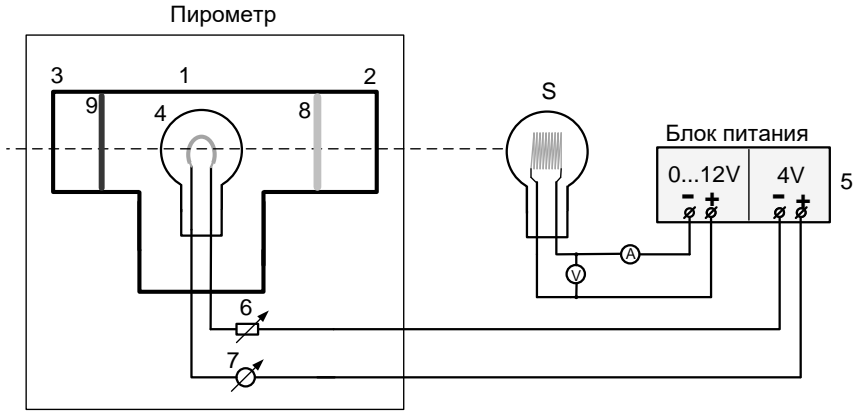


Рис. 602.2

Луч света от нагретой вольфрамовой нити источника S проходит через объектив 2, фотометрическую лампочку 4, окуляр 3 и попадает в глаз наблюдателя. Если оптическая труба настроена, то наблюдатель увидит в окуляре изображение источника S , на фоне которого будет видно изображение нити накала лампочки 4. Реостатом 6 изменяют ток накала нити лампочки 4 до тех пор, пока её яркость не совпадет с яркостью изображения источника S (в этом случае часть нити “исчезает”, т.е. становится неразличимой на фоне изображения источника S (рис. 602.3).

Предварительно прибор градуируют по температуре нагрева абсолютно черного тела, нанося против делений шкалы амперметра 7 соответствующие значения температуры. Для нечёрного тела пирометр даёт значение температуры T_{λ} (яркостной температуры), при которой излучательная способность абсолютно чёрного тела для $\lambda_0 = 0,65$ мкм равна излучательной способности исследуемого тела, при температуре, до которой оно наг-

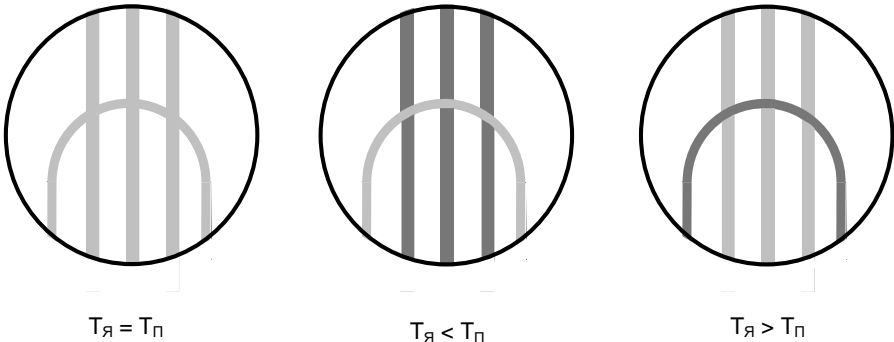


Рис. 602.3

рето (в этот момент их яркости равны):

$$r^*(\lambda_0, T_{\text{я}}) = r(\lambda_0, T), \quad (602.10)$$

где T – истинная температура тела. Из (602.1) следует, что

$$r(\lambda_0, T) = A(\lambda_0, T) \cdot r^*(\lambda_0, T). \quad (602.11)$$

Сравнивая (602.10) с (602.11) с учетом (602.2), получим

$$A(\lambda_0, T) = \frac{r^*(\lambda_0, T_{\beta})}{r^*(\lambda_0, T)} = \frac{e^{T_0/T} - 1}{e^{T_0/T_{\beta}} - 1} = K_{\beta}, \quad (602.12)$$

где $K_{\text{я}} = A(\lambda_0, T)$ имеет два названия: коэффициент яркости или поглощающая способность излучающего нечёрного тела на длине волны λ_0 ($0 < K_{\beta} < 1$).

В соотношении (602.12) введена характеристическая температура T_0 , связанная с длиной волны λ_0 светофильтра, на которой проводятся измерения

$$T_0 = \frac{hc}{k\lambda_0}. \quad (602.13)$$

Для светофильтра, применяемого в пирометре, $\lambda_0 = 0,65$ мкм, поэтому $T_0 = 2,2 \cdot 10^4$ К. Максимальное значение температуры, измеряемое пирометром, не превышает $2,2 \cdot 10^3$ К.

Это позволяет упростить (602.12), поскольку для этого диапазона температур $\exp(T_0/T) \gg 1$ и $\exp(T_0/T_\beta) \gg 1$:

$$K_\beta \approx \exp\left\{T_0\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\beta}\right)\right\}. \quad (602.14)$$

Из (602.14) легко получить связь истинной температуры нагретого тела с яркостной температурой абсолютно чёрного тела:

$$T = \frac{T_\beta}{1 + \frac{T_\beta}{O_0} \cdot \ln(K_\beta)}. \quad (602.15)$$

Из (602.15) видно, что истинная температура нечёрного тела всегда больше яркостной ($\ln K_\beta < 0$).

602.6. Методика измерения температуры вольфрама яркостным пирометром

Эксперименты с излучением нечерных тел (вольфрам и другие металлы, применяемые в качестве нитей накаливания в осветительных приборах) показывают на то, что излучение нечерных тел может иметь селективный характер. Пунктирная кривая на рис. 602.1 указывает на то, что вольфрам обладает заметным селективным излучением в видимой части спектра (0,4 мкм – 0,6 мкм). Это обстоятельство делает вольфрам выгодным материалом для осветительных ламп накаливания.

Электрическая мощность

$$P = IU, \quad (602.16)$$

подводимая к лампе, только частично содержит мощность N , затрачиваемую на свечение лампы в видимом диапазоне длин волн, и в этом смысле ее коэффициент полезного действия (КПД) равен

$$0 < \eta = \frac{N}{P} < 1. \quad (602.17)$$

Осветительные лампы характеризуются световой отдачей. За меру световой отдачи нечерного тела принимают отношение полного светового потока (в люменах), посылаемого лампой перпендикулярно светящейся площадке, к мощности (в ваттах), затрачиваемой на ее свечение:

$$\beta = \frac{\Phi_{св}}{N}. \quad (602.18)$$

Как показывают опыты, световая отдача лампы обычно больше 1 и сильно зависит от температуры нагрева вольфрама и условий излучения (в вакууме или в газе). Световой поток нечерного тела связан с температурой формулой (602.9). Из равенства упомянутых потоков следует, что

$$\hat{O}_{\tilde{n}\hat{a}} = \chi \sigma T^4 S = \eta \beta IU, \quad (602.19)$$

где S – полная площадь светящейся поверхности нити накаливания лампы.

Все безразмерные величины, входящие в (602.19), зависят от температуры нагретого тела по-разному. Выделим в (602.19) безразмерный коэффициент (отношение подводимой электрической энергии к световому излучению абсолютно черного тела)

$$\mu(T) = \frac{\chi}{\beta \eta} = \frac{IU}{2S_0 \sigma T^4}, \quad (602.20)$$

где S_0 – площадь поверхности нити накала проекционной лампы, видимой в пирометре. Отношение (602.20) характеризует энергетические возможности преобразования электрической энергии в световую энергию абсолютно черного тела при использовании в качестве источника света накаливаемого вольфрама, который не является черным телом.

602.7. Описание установки

Исследуемая в лабораторной работе проекционная лампа имеет нить накаливания из вольфрама, выполненную в виде

прямоугольной площадки. Подводимая к нити накала электрическая мощность измеряется вольтметром и амперметром. Схема подключения проекционной лампы показана на рис. 602.2.

В работе для измерений применяется оптический пирометр ОППИР-09 со встроенным показывающим прибором. Он принадлежит к числу яркостных пирометров монохроматического излучения с исчезающей нитью переменного накала и измеряет температуру тел, нагретых выше температуры начала видимого свечения. ОППИР-09 имеет шкалу с двумя пределами измерения температуры: 800 – 1400 °С и 1200 – 2000 °С. При работе на последней шкале необходимо ввести дымчатый светофильтр 8 (см. рис. 602.2). Цена деления шкалы 20 °С. Основная погрешность прибора при измерении яркостной температуры для пределов измерения от 800 до 1400 °С не превышает ± 21 °С, а на шкале от 1200 до 2000 °С не превышает ± 30 °С.

В табл. 602.1 приведено соответствие T и $T_{я}$ в рабочем диапазоне температур пирометра первой шкалы, вычисленное по соотношению (602.15) для нагретого вольфрама, в предположении, что его коэффициент яркости 0,43 остаётся неизменным в этом диапазоне температур.

Таблица 602.1

$T_{я}, ^\circ\text{C}$	800	850	900	950	1 000	1 050	1 100	1 150	1 200
$T_{я}, \text{K}$	1 073	1 123	1 173	1 223	1 273	1 323	1 373	1 423	1 473
T, K	1 116	1 171	1 225	1 280	1 335	1 390	1 445	1 501	1 556
$T_{я}, ^\circ\text{C}$	1 250	1 300	1 350	1 400					
$T_{я}, \text{K}$	1 523	1 573	1 623	1 673					
T, K	1 611	1 666	1 721	1 776					

В работе по формуле (602.20) рассчитывается зависимость параметра μ от температуры. Для вольфрама он изменяется в диапазоне $0,1 < \mu < 0,7$ и с ростом температуры уменьшается.

602.8. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами экспериментальной установки, шкалами измерительных приборов. Занести в протокол классы точности, рабочие диапазоны измерительных приборов, рассчитать цену деления шкал приборов.

2. Произвести настройку пирометра. При снятом красном светофилтре в окуляре должны быть четко видны нить накала проекционной лампы и на ее фоне дугообразная нить фотометрической лампы пирометра. На окуляре и объективе пирометра имеются кольца с накаткой для наведения резкости.

3. Выставить регулятор выходного напряжения блока питания и регулятор накала нити пирометра в крайнее левое положение.

4. Включить тумблер «Сеть» блока питания.

5. Выставить минимальную яркостную температуру на пирометре регулятором тока накала нити пирометра.

6. Регулятором выходного напряжения блока питания включить проекционную лампу, установив на лампе слабое «красное свечение».

7. Наблюдая в окуляр пирометра и поворачивая регулятор выходного напряжения блока питания, добиться совпадения яркостей накала нити пирометра и нити проекционной лампы (см. рис. 602.3).

Внимание: при проведении измерений вначале на пирометре устанавливается температура, указанная в табл.602.1, а затем изменением тока и напряжения, подаваемого на проекционную лампу, добиваются совпадения яркостей нитей накала нагретой проекционной лампы и электрометрической лампы пирометра.

При измерении температур больше 1200 °С используйте дымчатый светофилтр.

8. При достижении совпадения яркостей накала нитей пирометра и лампы источника S снять показания яркостной температуры со шкалы пирометра и занести в таблицу.

9. Снять показания с вольтметра и амперметра для расчета мощности подводимой к лампе S , и занести в таблицу.

10. Дважды снять 13 точек зависимости температуры нагрева вольфрамовой нити от подводимой к ней электрической мощности P . Первый раз увеличиваем температуру накала проекционной лампы. Второй раз уменьшаем температуру накала проекционной лампы. Средние значения результатов эксперимента заносим в табл. 602.2, в колонки со второй по шестую.

11. Измерения температуры проводить с шагом $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ по шкале пирометра от $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

12. Определить по табл. 602.1 истинную температуру проекционной лампы S (либо рассчитать самостоятельно по (602.15)).

13. Рассчитать, используя законы теплового излучения, величины λ_m (602.3), r_m^* (602.4), $R^*(T)$ (602.5), μ (602.20), $P^*_t = R^*S$ для вольфрама, в предположении, что это абсолютно черное тело.

14. Площадь излучающей поверхности нити накала проекционной лампы, видимой в пирометре $S_0 = (44 \pm 5)\text{ мм}^2$, считать известной из прямых измерений.

15. На миллиметровой бумаге построить графики зависимости:

а) температуры накала вольфрама $T=T(P)$ от подводимой электрической мощности P ;

б) зависимость $\mu = \mu(T)$.

602.9. Расчет погрешности измерения параметра μ

Погрешность измерения параметра преобразования μ определяем по формуле косвенных измерений, получаемой из (602.20). Оценку погрешности выполняем для строки 9 в табл. 602.2. Формулу для расчета погрешности μ получить самостоятельно и привести в лабораторной работе. Сделать необходимые выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое тепловое (температурное) свечение тел и какими особенностями оно обладает?

Таблица 602.2

№ п/п	I , А	U , В	P , Вт	$T_{я}$, °С	T , К	μ	λ_m , мкм	r^*_{m} , ГВт/м ³	$R^*(T)$, кВт/м ²	P^*_t , Вт
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										

2. Что означает динамическое равновесие тела со своим тепловым излучением?

3. Какие количественные характеристики характеризуют излучательную и поглощательную способности нагретых тел? От чего они зависят?

4. Сформулируйте и запишите закон Кирхгофа.

5. Что такое универсальная функция Кирхгофа и какой аналитический вид она имеет?

6. Приведите график зависимости излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны и сравните его с излучательной способностью вольфрама. Какие выводы можно из этого сделать?

7. Какие тела Кирхгоф называл абсолютно черными?

8. Сформулируйте и запишите закон Вина. Как связана мощность теплового излучения с поверхностью, на которой происходит излучение?

9. Сформулируйте и запишите закон сохранения потока при излучении точечных тел.

10. Как можно трансформировать закон Стефана – Больцмана для излучения нечерных тел?

11. Расскажите о методике измерения температуры абсолютно черных тел пирометром.

12. Для чего в пирометре предназначена фотометрическая лампочка? Дымчатый фильтр? Красный светофильтр?

13. Дайте определение коэффициента яркости.

14. Что такое характеристическая температура пирометра?

15. Запишите выражение, связывающее яркостную температуру пирометра с истинной температурой тела.

16. Сформулируйте энергетические характеристики осветительных приборов, нагреваемых электрическим током.

17. Как зависит энергетическая светимость абсолютно черного тела от температуры?

18. Прямые измерения каких параметров вносят наибольшую погрешность в конечный результат при измерении параметра μ ? Что нужно сделать для того, чтобы ее уменьшить?

603. ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

603.1. Цель работы