

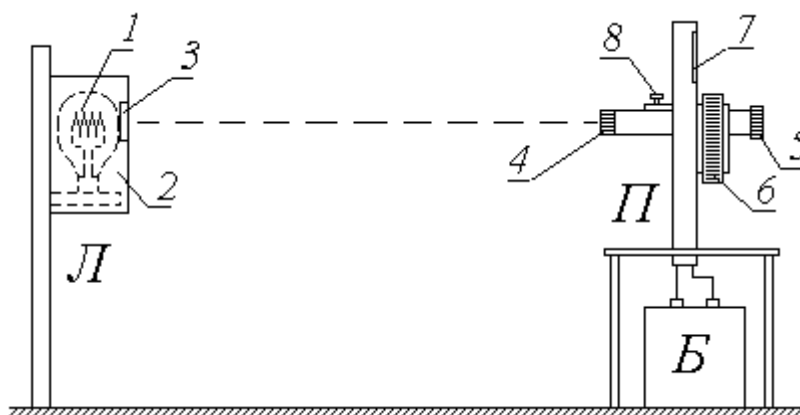
*Работа 5.3*  
**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
 С ПОМОЩЬЮ ЯРКОСТНОГО ПИРОМЕТРА**

- Цель работы:
- 1) ознакомление с принципом действия яркостного пирометра и практическое измерение яркостной температуры нагретого тела;
  - 2) применение закона Кирхгофа и формулы Планка для определения истинной температуры тела;
  - 3) экспериментальная проверка справедливости закона Стефана-Больцмана.

Описание установки и методики измерений

Объектом исследования в данной работе является раскаленная нить  $L$  лампы. Лампа помещена в защитный кожух  $2$ , в котором имеется прямоугольное окно  $3$ . Проходя через это окно, излучаемый лампой свет попадает на объектив  $4$  яркостного пирометра  $\Pi$  – специального прибора для бесконтактного (осуществляемого на расстоянии) измерения высоких температур.

*Схема экспериментальной установки*



$L$  – исследуемая лампа;  $\Pi$  – пирометр;  $B$  – батарея питания.

$1$  – нить накала лампы  $L$ ;  $2$  – защитный кожух;  $3$  – окно;

$4$  – объектив;  $5$  – окуляр;  $6$  – кольцо потенциометра;

$7$  – шкала;  $8$  – ввод/вывод нейтрального светофильтра

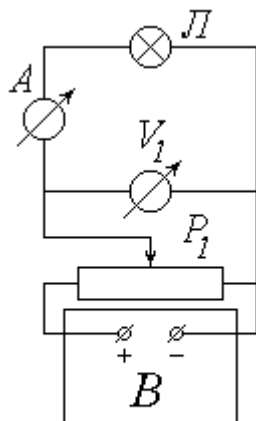


Схема питания лампы  $L$  от выпрямителя  $B$  изображена на рис. 38. Подаваемое на лампу напряжение регулируется с помощью потенциометра  $P_1$  (практически это осуществляется вращением ручки на щите блока питания, в состав которого входит выпрямитель  $B$ ) и измеряется вольтметром  $V_1$ ; для измерения силы тока, протекающего по нити накала  $L$ , служит амперметр  $A$ .

Рис. 38

Основной частью пирометра  $\Pi$  является вмонтированная внутри прибора пирометрическая эталонная лампа  $\mathcal{E}$ . Эталонная лампа питается от внешней аккумуляторной батареи  $\mathcal{B}$  по схеме, изображенной на рис. 39. Цепь замыкается тумблером  $\mathcal{K}$ , расположенным у основания пирометра. Потенциометр  $P_2$  служит для регулирования подаваемого на лампу  $\mathcal{E}$  напряжения; на практике это осуществляется вращением кольца  $\delta$  на корпусе прибора. Температура нити накала эталонной лампы однозначно связана с подаваемым на нее напряжением; поэтому шкала  $\mathcal{I}$  измеряющего его вольтметра  $V_2$  проградуирована в градусах Цельсия.

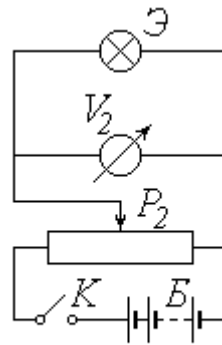


Рис. 39

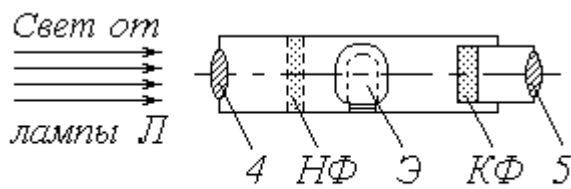


Рис. 40

Попадающий на объектив 4 свет от исследуемой лампы  $\mathcal{L}$  проходит через систему линз оптической трубы пирометра (рис. 40), позволяющую наблюдать в окуляр 5 совмещенные в одной плоскости изображения нитей накала исследуемой ( $\mathcal{L}$ ) и эталонной

( $\mathcal{E}$ ) ламп. Расположенный в оптической трубе красный светофильтр  $\mathcal{K}\Phi$  пропускает в окуляр практически монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 660 \text{ нм}$ ; поэтому изображения нитей имеют красную окраску.

Изменяя напряжение, подаваемое на эталонную лампу, можно добиться одинаковой яркости обеих нитей. Рис. 41 показывает наблюдаемую в окуляр картину в случаях, когда яркость нити  $\mathcal{E}$  меньше ( $a$ ), больше ( $b$ ) и равна ( $в$ ) яркости нити  $\mathcal{L}$ . В последнем случае эталонная нить становится незаметной на фоне исследуемой (поэтому приборы такого типа называют пирометрами с исчезающей нитью).

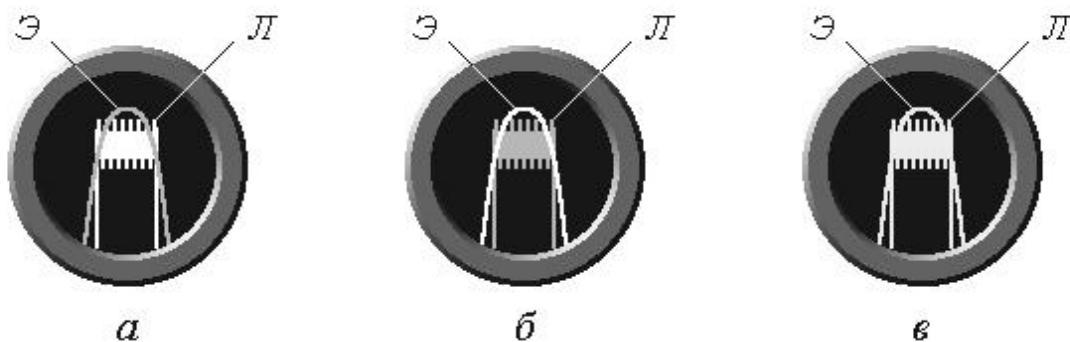


Рис. 41

При высокой температуре лампы  $L$  предусмотрено введение нейтрального светофильтра  $H\Phi$  с помощью рычажка  $\delta$  на корпусе пирометра. Нейтральный светофильтр уменьшает яркость изображения нити  $L$  и позволяет уравнивать яркости наблюдаемых в окуляр нитей при меньшем напряжении на лампе  $\mathcal{E}$ . При введенном светофильтре  $H\Phi$  показания пирометра снимаются с его нижней шкалы, а при выведенном (низкие температуры) – с верхней.

В отсутствие красного светофильтра  $K\Phi$  яркость изображения нити прямо пропорциональна ее излучательности (энергетической светимости)  $R$ , т.е. энергии, излучаемой за единицу времени с единицы площади поверхности тела (нити) во всем диапазоне длин волн. Через светофильтр  $K\Phi$  проходит лишь часть этой энергии  $\Delta R_\lambda$ , соответствующая интервалу длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + \Delta\lambda$ . Для достаточно узкого интервала  $\Delta\lambda$  можно положить

$$\Delta R_\lambda \approx r(\lambda, T) \cdot \Delta\lambda, \quad (1)$$

где  $r(\lambda, T) = \frac{dR_\lambda}{d\lambda}$  – спектральная плотность излучательности (испускаемая способность) тела;  $T$  – его абсолютная температура.

Проблема градуировки пирометра заключается в том, что различные тела имеют разные значения спектральной плотности излучательности при одних и тех же длине волны и температуре. Открытые экспериментально и обоснованные теоретически законы описывают тепловое излучение *абсолютно черного тела* ( $AЧТ$ ). Поэтому проградуированная соответствующим образом шкала пирометра показывает не истинную температуру  $T$  нити эталонной лампы  $\mathcal{E}$ , а так называемую *яркостную температуру*  $T_y$ , т.е. температуру  $AЧТ$ , имеющего такую же яркость. При выравнивании яркостей нитей  $L$  и  $\mathcal{E}$  значения  $\Delta R_\lambda$  у них становятся одинаковыми. Учитывая (1), можем записать

$$r(\lambda, T) = r_0(\lambda, T_y), \quad (2)$$

где  $r_0(\lambda, T_y)$  – спектральная плотность излучательности абсолютно черного тела при температуре  $T_y$ .

Как следует из *закона Кирхгофа*, спектральные плотности излучательности реального тела  $r(\lambda, T)$  и  $AЧТ$   $r_0(\lambda, T)$  связаны соотношением

$$r(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) \cdot r_0(\lambda, T), \quad (3)$$

где  $\alpha(\lambda, T)$  – коэффициент поглощения (степень черноты) тела. У многих тел, в частности, у вольфрама, из которого изготовлена нить лампы  $L$ , коэффициент поглощения не очень сильно зависит от температуры (см. справочные данные в приложении). Поэтому можно с достаточной степенью точности использовать для заданной длины волны  $\lambda$  осредненное в данном температурном диапазоне значение  $\alpha_\lambda$ . Тогда последнее соотношение примет вид

$$r(\lambda, T) = \alpha_\lambda \cdot r_0(\lambda, T). \quad (4)$$

Приравнивая друг другу правые части выражений (2) и (4), получим:

$$\alpha_\lambda \cdot r_0(\lambda, T) = r_0(\lambda, T_y). \quad (5)$$

Зависимость спектральной плотности излучательности АЧТ от длины волны и температуры (универсальная функция Кирхгофа)  $r_0(\lambda, T)$  описывается формулой Планка

$$r_0(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1},$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света в вакууме;  $k$  – постоянная Больцмана. При сравнительно низких температурах ( $T < 6000 \text{ K}$ ) единицей в квадратных скобках можно пренебречь, и формула Планка примет вид

$$r_0(\lambda, T) \approx \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT}\right).$$

Подставляя последнее выражение в (5), получим:

$$\alpha_\lambda \cdot \exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT}\right) = \exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT_y}\right)$$

или, после логарифмирования:

$$\ln \alpha_\lambda - \frac{hc}{\lambda kT} = -\frac{hc}{\lambda kT_y}. \quad (6)$$

Уравнение (6) связывает истинную температуру  $T$  излучающего тела с его яркостной температурой  $T_y$ . Решая его относительно  $T$ , находим:

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_y} + C}, \quad (7)$$

где

$$C = \frac{\lambda k \ln \alpha_\lambda}{hc}. \quad (8)$$

Как известно, тепловое излучение тел имеет место при любой отличной от абсолютного нуля температуре. Поэтому отключенная от источника питания нить лампы  $L$  излучает энергетический поток

$$\Phi_0 = S \cdot R(T_0), \quad (9)$$

где  $S$  – площадь поверхности нити;  $R(T_0)$  – ее излучательность при комнатной температуре  $T_0$ . После подключения лампы к сети питания ее нить разогревается за счет джоулева тепла до температуры  $T$  и излучает энергетический поток

$$\Phi = S \cdot R(T), \quad (10)$$

превышающий  $\Phi_0$  на величину потребляемой лампой мощности:

$$\Phi - \Phi_0 = \eta P, \quad (11)$$

где  $\eta$  – КПД питающей цепи, учитывающий различные энергопотери. Мощность  $P$  легко рассчитать как

$$\boxed{P = UI}, \quad (12)$$

где  $U$  – питающее напряжение;  $I$  – сила тока в цепи.

С учетом (9) и (10) уравнение (11) можно переписать в виде

$$S \cdot [R(T) - R(T_0)] = \eta P. \quad (13)$$

Излучательность  $R(T)$  определяется из интегрального соотношения

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\lambda, T) \cdot d\lambda$$

или, с учетом (3):

$$R(T) = \int_0^{\infty} \alpha(\lambda, T) \cdot r_0(\lambda, T) \cdot d\lambda.$$

Считая нить лампы  $L$  серым телом, т.е. пренебрегая зависимостью ее коэффициента поглощения от длины волны и заменив функцию  $\alpha(\lambda, T)$  ее осредненным во всем диапазоне длин волн значением  $\alpha_T$ , получим:

$$R(T) \approx \alpha_T \cdot \int_0^{\infty} r_0(\lambda, T) \cdot d\lambda = \alpha_T \cdot R_0(T),$$

где  $R_0(T)$  – излучательность абсолютно черного тела. Согласно закону Стефана-Больцмана зависимость  $R_0(T)$  имеет вид

$$R_0(T) = \sigma T^4,$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

С учетом принятых допущений выражение (13) примет вид

$$\alpha_T \cdot T^4 - \alpha_{T_0} \cdot T_0^4 = \frac{\eta}{\sigma S} \cdot P. \quad (14)$$

Значения коэффициента поглощения  $\alpha_{T_0}$  (при температуре  $T_0$ ) и  $\alpha_T$  (при температуре  $T$ ) составляют десятые доли единицы, т.е. являются величинами одного порядка, в то время как абсолютная температура раскаленной нити в четыре-пять раз превышает комнатную температуру  $T_0$ . Таким образом,  $T_0^4 \ll T^4$  и вычитаемым в левой части уравнения (14) можно пренебречь. Перепишем это уравнение в виде

$$T^4 \approx C_1 \cdot P, \quad (15)$$

где  $C_1 = \frac{\eta}{\sigma S \alpha_T}$ .

Логарифмируя уравнение (15) и выражая из него величину  $\ln T$ , получим

$$\ln T = C_2 + 0,25 \ln P, \quad (16)$$

где  $C_2 = 0,25 \ln C_1$ .

Из соотношения (16) следует, что график зависимости  $\ln T$  от  $\ln P$  должен иметь характер, близкий к линейному с угловым коэффициентом, примерно равным 0,25.

*Порядок измерений и обработки результатов*

1. Ознакомьтесь с лабораторной установкой и измерительными приборами. Определите цену деления вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A$  в цепи питания лампы  $L$ ; научитесь снимать показания этих приборов.

2. Подключите эталонную лампу  $L$  к батарее питания  $B$ , замкнув тумблер  $K$  у основания пирометра.

3. Вращая по часовой стрелке кольцо  $b$  потенциометра  $P_2$  на корпусе пирометра, увеличивайте подаваемое на эталонную лампу  $\mathcal{E}$  напряжение до тех пор, пока в окуляр не будет видна нить этой лампы (имеющая форму дуги). Если это изображение наблюдается не в красном свете, то введите красный светофильтр  $K\Phi$ , повернув по часовой стрелке накатанное кольцо на оправе окуляра.

4. Ознакомьтесь с верхней и нижней шкалами пирометра и научитесь снимать их показания.

5. Убедитесь в том, что нейтральный светофильтр  $H\Phi$  выведен (при этом рычажок  $\delta$  на корпусе пирометра должен быть повернут против часовой стрелки до упора). Под руководством преподавателя или лаборанта включите в сеть цепь питания исследуемой лампы  $L$ .

6. Запишите в таблицу рекомендуемые значения напряжения  $U$ . Действуя потенциометром  $P_1$  и наблюдая за показаниями вольтметра, установите наименьшее из этих значений.

Номер опыта	$U, B$	$I, A$	$P, Вт$	$\ln P$	$t, ^\circ C$	$T_{я}, K$	$T, K$	$\ln T$
1					$t_1 =$ $t_2 =$ $t_3 =$ $t =$			
2					$t_1 =$ ...			
6					$t_1 =$ $t_2 =$ $t_3 =$ $t =$			

7. Посмотрите в окуляр пирометра и убедитесь в том, что нить лампы  $L$  видна в поле зрения.

8. Снимите показания амперметра  $A$  и запишите значение силы тока в таблицу.

9. Наблюдая в окуляр пирометра изображения обеих нитей и вращая кольцо  $b$  потенциометра  $P_2$ , добейтесь их одинаковой яркости (см. рис. 41). По шкале пирометра определите яркостную температуру нити и занесите ее значение (в  $^\circ C$ ) в таблицу.

10. Не глядя в окуляр, поверните кольцо  $b$  против часовой стрелки, тем самым сбив настройку пирометра.

11. Повторите пп. 9 и 10 еще дважды. Рассчитайте и занесите в таблицу среднее из трех значений температуры  $t$ . Переведите это значение из  $^{\circ}\text{C}$  в кельвины и заполните следующий столбец таблицы ( $T_{\text{я}}$ ).

12. Увеличивая напряжение  $U$  на лампе  $L$  согласно рекомендациям, выполните пп. 8-11 еще пять раз. Когда показания пирометра будут близки к концу его верхней шкалы, поворотом рычажка  $8$  по часовой стрелке на  $90^{\circ}$  введите нейтральный светофильтр  $H\Phi$ ; после этого считывайте показания с нижней шкалы.

13. Для каждого из проделанных опытов рассчитайте по формуле (12) мощность  $P$  и величину  $\ln P$ ; занесите найденные значения в соответствующие столбцы таблицы.

14. Используя справочные данные о коэффициенте поглощения вольфрама (см. график на с. 150 приложений), оцените его среднее в исследованном температурном диапазоне значение  $\alpha_{\lambda}$  при длине волны  $\lambda = 660 \text{ нм}$ . Выразив величину  $\lambda$  в метрах, по формуле (8) вычислите константу  $C$  (в  $\text{K}^{-1}$ ) и запишите ее в тетрадь.

15. Для каждого опыта рассчитайте по формуле (7) истинную температуру  $T$  нити накала лампы  $L$ , а также величину  $\ln T$ . Заполните соответствующие столбцы таблицы.

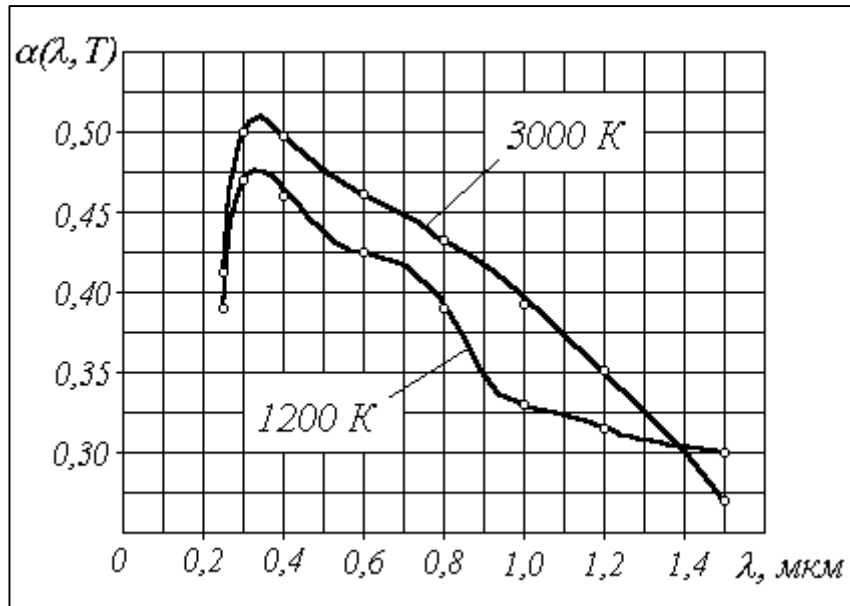
16. Нанесите экспериментальные точки на график зависимости  $\ln T$  от  $\ln P$ ; проведите по ним сглаживающую прямую. Оцените (с учетом масштаба!) угловой коэффициент этой прямой. Сделайте вывод о применимости закона Стефана-Больцмана для данного объекта исследования.

### *Контрольные вопросы*

1. Тепловое излучение и его характеристики: энергетический (световой) поток; излучательность (энергетическая светимость); спектральная плотность излучательности (испускательная способность). Связь между этими характеристиками.
2. Коэффициенты пропускания, отражения и поглощения. Серые тела. Абсолютно черное тело ( $AЧТ$ ). Закон Кирхгофа.
3. Универсальная функция Кирхгофа и ее физический смысл. Законы излучения  $AЧТ$ : закон Стефана-Больцмана; законы Вина.
4. Гипотеза Планка о квантовом характере излучения. Формула Планка.
5. Пирометры и их назначение. Яркостный пирометр. Яркостная температура тела и ее связь с истинной температурой.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

Коэффициент поглощения (степень черноты) вольфрама  $\alpha$



Постоянная Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К

Постоянная Планка  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с

Постоянная Стефана-Больцмана  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>)