



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный  
технический университет**

---

---

**Кафедра «Техническая физика»**

**ИЗУЧЕНИЕ ЯРКОСТНОГО МЕТОДА  
ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ  
В ОПТИЧЕСКОЙ ПИРОМЕТРИИ**

**Лабораторная работа № 312**

**Минск  
БНТУ  
2013**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Техническая физика»

ИЗУЧЕНИЕ ЯРКОСТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРЫ В ОПТИЧЕСКОЙ ПИРОМЕТРИИ

Лабораторная работа № 312

Минск  
БНТУ  
2013

УДК 53 (075.4)  
ББК 22.3я73  
ИЗ9

С о с т а в и т е л и :

*И. А. Хорунжий, В. И. Кудин,  
Т. С. Кононова, А. В. Федотенко*

Р е ц е н з е н т ы :

*Д. С. Доманевский, В. Н. Кушнир*

В лабораторной работе рассмотрены основные характеристики и законы теплового излучения, а также методы измерения температуры тел с помощью оптического пирометра.

Издание окажет помощь студентам дневной и заочной форм обучения в выполнении лабораторных работ физического практикума при изучении физики в техническом университете.

УДК 53 (075.4)  
ББК 22.3я73

© Белорусский национальный  
технический университет, 2013

### **Цели:**

1. Ознакомиться с основными характеристиками теплового излучения и с законами теплового излучения.
2. Ознакомиться с методами оптической пирометрии, т. е. с методами определения температуры нагретых тел бесконтактным оптическим путем.
3. Экспериментально определить постоянную Стефана–Больцмана и оценить погрешность ее измерения.

### **Теоретические сведения**

*Тепловое излучение* – это электромагнитное излучение нагретых тел, осуществляемое за счет их внутренней (тепловой) энергии. Все тела при отличной от абсолютного нуля температуре, т. е. при  $T > 0$  К являются источником теплового излучения.

Из опыта известно, что тела, находящиеся в изолированной системе в вакууме (вследствие чего обмен энергией возможен только посредством электромагнитного излучения), через некоторое время приходят в тепловое равновесие. При тепловом равновесии каждое тело за единицу времени поглощает столько же энергии, сколько теряет вследствие излучения, поэтому температура тел не изменяется с течением времени. Возможность установления равновесия в системе «тело–излучение» обусловлено тем, что интенсивность теплового излучения возрастает при нагревании тел.

Равновесное тепловое излучение характеризуется нижеперечисленными величинами.

*Энергетическая светимость  $R_y$  – величина, равная количеству энергии, излучаемой с единицы площади поверхности тела за единицу времени на всех длинах волн от  $\theta$  до  $\infty$ :*

$$R_y = \frac{dW}{dS dt},$$

где  $dW$  – энергия, излучаемая с поверхности площадью  $dS$  за время  $dt$ .

$$\text{Размерность энергетической светимости} - [R_y] = \frac{\ddot{A} \ddot{x}}{\dot{\gamma}^2 \cdot \ddot{n} \cdot \dot{\gamma}} = \frac{\ddot{A} \dot{\delta}}{\dot{\gamma}^2}.$$

Так как испускание электромагнитного излучения на разных длинах волн происходит с разной интенсивностью, то вводится еще одна величина – спектральная плотность энергетической светимости  $r_{\lambda, T}$ .

**Спектральной плотностью энергетической светимости  $r_{\lambda, T}$  называется величина, численно равная энергии, излучаемой с единицы площади поверхности тела за единицу времени в единичном интервале длин волн вблизи заданной длины волны  $\lambda$ :**

$$r_{\lambda, T} = \frac{dW_{\lambda}}{dS dt d\lambda},$$

где  $dW_{\lambda}$  – энергия, излучаемая в узком спектральном интервале на длинах волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$  с поверхности площадью  $dS$  за время  $dt$ .

Спектральная плотность энергетической светимости зависит от длины волны, температуры и от природы тела. Размерность спектральной плотности энергетической светимости –

$$[r_{\lambda, T}] = \frac{\ddot{A} \ddot{x}}{\dot{\gamma}^2 \cdot \ddot{n} \cdot \dot{\gamma}} = \frac{\ddot{A} \dot{\delta}}{\dot{\gamma}^2 \cdot \dot{\gamma}}.$$

Между величинами  $R_y$  и  $r_{\lambda, T}$  существует связь:

$$R_y = \int_0^{\infty} r_{\lambda, T} d\lambda.$$

Нагретые тела могут не только излучать, но и поглощать падающее на них излучение других нагретых тел. Величина, определяющая отношение количества энергии, поглощенной телом, к величине энергии, падающей на тело, для узкого ин-

тервала длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$  при данной температуре называется *монохроматической поглотательной способностью тела*  $\alpha_{\lambda, T}$ . По определению

$$\alpha_{\lambda, T} = \frac{W_{\lambda, T}^{\text{погл}}}{W_{\lambda, T}^{\text{пад}}},$$

где  $\alpha_{\lambda, T}$  – безразмерная величина, которая зависит от длины волны, температуры и от природы тела.

Этот коэффициент показывает, какая доля лучистой энергии, падающей на тело в единицу времени и на единицу поверхности в узком интервале длин волн, поглощается поверхностью. Если коэффициент  $\alpha_{\lambda, T}$  не зависит от длины волны, то его называют *коэффициентом серости*. Для серых тел  $0 < \alpha_T < 1$ .

***Абсолютно черным называется тело, поглощающее при любой температуре все падающее на его поверхность излучение любой длины волны.***

Для абсолютно черных тел  $\alpha_{\lambda, T} = 1$ . В природе абсолютно черных тел нет, однако можно изготовить их модель, очень близкую по своим свойствам к черному телу. Практически идеальной моделью является замкнутая полость, внутренняя поверхность которой зачернена, с небольшим отверстием  $OU$  (рис. 1). Полость изолирована от внешней среды. Луч света, попав через отверстие внутрь этой полости, многократно отражается. При каждом отражении часть энергии луча поглощается, поэтому излучение практически не выходит из полости.

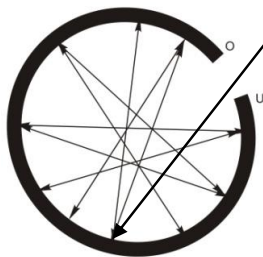


Рис. 1. Модель абсолютно черного тела

Кирхгоф открыл закон, согласно которому *отношение спектральной плотности энергетической светимости к монокроматической поглотительной способности не зависит от природы тела и является универсальной функцией  $f(\lambda, T)$ , зависящей от длины волны и температуры*. Приведенный закон называют законом Кирхгофа для теплового излучения, а функцию  $f(\lambda, T)$  – функцией Кирхгофа. Для системы тел, находящихся в термодинамическом равновесии при температуре  $T$ , закон Кирхгофа имеет вид

$$\left(\frac{r_{\lambda, T}}{\alpha_{\lambda, T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda, T}}{\alpha_{\lambda, T}}\right)_2 = \left(\frac{r_{\lambda, T}}{\alpha_{\lambda, T}}\right)_3 = \dots = f(\lambda, T).$$

Здесь индексы 1, 2, 3, ... означают, что указанные отношения берутся для 1-го, 2-го, 3-го тела системы и т. д.

Так как для абсолютно черного тела  $\alpha_{\lambda, T} = 1$ , то  $f(\lambda, T) = r_{\lambda, T}$  и, следовательно, функция Кирхгофа равна спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела для той же длины волны и температуры.

В результате опытов по изучению распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела были получены кривые, представляющие собой зависимость спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при различных температурах (рис. 2).

Тщательное исследование теплового излучения абсолютно черного тела позволило установить следующие законы.

1. Закон Стефана–Больцмана: *энергетическая светимость абсолютно черного тела прямо пропорциональна абсолютной температуре тела в четвертой степени:*

$$R_y = \sigma T^4, \tag{1}$$

где  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup> – постоянная Стефана–Больцмана.

2. Закон смещения Вина: *длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре тела:*

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (2)$$

где  $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$  м · К – постоянная Вина.

3. Второй закон Вина: *максимальная спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела прямо пропорциональна абсолютной температуре тела в пятой степени:*

$$r_{\lambda, \max} = C \cdot T^5, \quad (3)$$

где  $C = 1,3 \cdot 10^{-5}$  Вт/(м<sup>3</sup> · К<sup>5</sup>) – постоянная Вина.

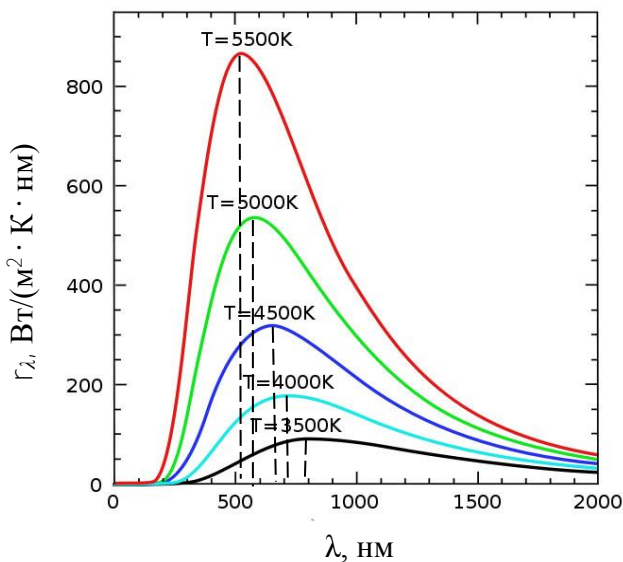


Рис. 2. Зависимость спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при различных температурах тела



Приведенные законы были получены экспериментальным путем. В то же время многочисленные попытки теоретически получить эти законы оказывались неудачными. Только в 1900 году Планк, на основе допущения о том, что тела могут излучать и поглощать энергию дискретно в виде определенных порций (квантов), и, используя законы статической физики, получил правильную формулу для спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, которую называют «формулой Планка»:

$$r_{\lambda, T} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/(kT\lambda)} - 1}, \quad (4)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;

$\lambda$  – длина волны света;

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

$T$  – абсолютная температура тела.

Энергия кванта света полагается равной

$$E = h\nu = hc/\lambda,$$

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;

$\nu$  – частота света.

Формула Планка (4) дает возможность получить и описать все экспериментально полученные законы теплового излучения.

При интегрировании формулы Планка (4) по всем длинам волн может быть получен закон Стефана–Больцмана:

$$R_y = \int_0^{\infty} r_{\lambda, T} d\lambda = \sigma T^4.$$

Чтобы найти длину волны, которой соответствует максимум спектральной плотности энергетической светимости, нужно приравнять к нулю производную формулы Планка:

$$\frac{dr_{\lambda, T}}{d\lambda} = 0.$$

При этом получается закон смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}.$$

При подстановке  $\lambda_{\max}$  в формулу Планка был получен второй закон Вина:

$$r_{\lambda, T_{\max}} = C T^5.$$

Таким образом, формула Планка, полученная в предположении о квантовой природе света, дает правильное, совпадающее с опытом описание всех особенностей и закономерностей равновесного излучения абсолютно черного тела. На основе волновых представлений о свете этого сделать нельзя.

В основе оптических бесконтактных методов измерения температуры лежат законы излучения абсолютно черного тела.

1. Метод, основанный на законе Стефана–Больцмана, заключается в измерении энергии, излучаемой за единицу времени с единицы площади исследуемого тела на всех длинах волн. Как уже отмечалось, эта величина представляет собой энергетическую светимость исследуемого тела. Если исследуемое тело является абсолютно черным, то температура, рассчитанная с использованием измеренной энергетической светимости и формулы (1), дает истинную температуру исследуемого тела. Если же исследуемое тело не является абсолютно черным, то рассчитанная таким образом температура называется радиационной.

***Радиационная температура – это температура абсолютно черного тела, имеющего такую же энергетическую светимость, что и исследуемое тело.***

Данный метод имеет смысл применять лишь для измерения температуры объектов, близких по своим спектральным характеристикам к абсолютно черному телу.

2. Метод, основанный на законе смещения Вина, заключается в том, что для исследуемого тела изучается зависимость спектральной плотности энергетической светимости  $I_\lambda$  от длины волны и определяется длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости. После этого из соотношения (2) вычисляется температура тела. Если исследуемое тело является абсолютно черным, то полученная таким образом температура будет истинной температурой тела. Если же тело не является абсолютно черным, то измеренная таким методом температура называется цветовой.

***Цветовая температура – температура абсолютно черного тела, имеющего максимум спектральной плотности энергетической светимости на той же длине волны, что и исследуемое тело.***

Данный метод измерения температуры можно использовать лишь применительно к объектам, имеющим непрерывный спектр излучения, незначительно отличающийся от спектра излучения абсолютно черного тела. Этим методом была измерена температура поверхности Солнца.

3. В основе яркостного метода лежат особенности человеческого глаза, который с невысокой точностью измеряет абсолютную яркость светящегося объекта (результат измерения сильно зависит от того, в каких условиях освещенности находился глаз до начала измерения), но способен с высокой точностью замечать разницу в яркости близко расположенных объектов, особенно если их излучение имеет одинаковый спектральный состав. Суть метода «исчезающей нити» заключается в том, что на изображение светящейся поверхности исследуемого тела накладывается изображение нити пирометра. Наблюдение ведется через светофильтр, т. е. в узком спектральном интервале. При изменении силы электрического тока в нити

пирометра изменяется яркость ее свечения. В ходе измерения необходимо добиться того, чтобы граница изображения нити на фоне исследуемого тела стала неразличимой, т. е. «нить исчезает». При этом яркость свечения поверхности исследуемого тела оказывается равной с высокой точностью яркости нити пирометра. Обычно температура светящихся объектов измеряется при длине волн  $\lambda = 660$  нм. Яркость свечения нити пирометра градуируется по яркости абсолютно черного тела, поэтому, измерив силу тока через нить пирометра, можно по специальной градуировочной таблице определить температуру абсолютно черного тела, имеющего такую же яркость на заданной длине волны, что и исследуемое тело. Если исследуемое тело является абсолютно черным, то измеренная таким образом температура является истинной температурой тела. Если же исследуемое тело не является абсолютно черным, то измеренная данным методом температура называется яркостной.

***Яркостная температура – это температура абсолютно черного тела, которое на заданной длине волны имеет такую же яркость, как и исследуемое тело.*** Зная яркостную температуру можно рассчитать истинную температуру тела, если известен яркостный коэффициент, определяемый как отношение яркости исследуемого тела к яркости абсолютно черного тела при условии, что их температуры одинаковы:

$$K_y = \frac{B'_\lambda(T_\theta)}{B_\lambda(T_\theta)},$$

где  $B'_\lambda(T_\theta)$  – яркость исследуемого тела на длине волны  $\lambda$ ;

$B_\lambda(T_\theta)$  – яркость абсолютно черного тела на той же длине волны и при той же температуре  $T_\theta$ , что и температура исследуемого тела.

Следовательно, при измерении, когда яркость исследуемого тела равна яркости нити пирометра, выполняется соотношение

$$B_{\lambda} = K_{\bar{y}} B_{\lambda}(T_{\bar{e}}) = B_{\lambda}(T_{\bar{y}}), \quad (5)$$

где  $B_{\lambda}(T_{\bar{e}})$  – яркость абсолютно черного тела, имеющего температуру исследуемого тела;

$B_{\lambda}(T_{\bar{y}})$  – яркость абсолютно черного тела, имеющего такую же яркость, как и исследуемое тело на заданной длине волны.

Для пересчета измеренной яркостной температуры  $T_{\bar{y}}$  в истинную температуру тела  $T_{\bar{e}}$  воспользуемся тем, что яркость абсолютно черного тела пропорциональна его спектральной плотности энергетической светимости на этой же длине волны, поэтому вместо выражения (5) можно рассматривать соотношение

$$K_{\bar{y}} r_{\lambda}(T_{\bar{e}}) = r_{\lambda}(T_{\bar{y}}).$$

Воспользуемся формулой (2) и подставим выражение для спектральной плотности энергетической светимости в явном виде:

$$K_{\bar{y}} \cdot \frac{2\pi\nu^2}{r^2} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/(kT_{\bar{e}})} - 1} = \frac{2\pi\nu^2}{r^2} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/(kT_{\bar{y}})} - 1}. \quad (6)$$

Если учесть, что  $h\nu/(kT) \gg 1$ , то единицей в знаменателях этого выражения можно пренебречь и после несложных преобразований выражение (6) приобретает вид

$$K_{\bar{y}} e^{-h\nu/(kT_{\bar{e}})} = e^{-h\nu/(kT_{\bar{y}})}. \quad (7)$$

После логарифмирования выражаем из (7) истинную температуру тела по формуле

$$T_{\bar{e}} = \frac{h\nu T_{\bar{y}}}{h\nu + T_{\bar{y}} k \ln K_{\bar{y}}}. \quad (8)$$

Таким образом, если известен яркостный коэффициент, то измерив яркостную температуру тела можно рассчитать его истинную температуру.

### Схема эксперимента

Приборы и принадлежности: пирометр с исчезающей нитью, вольтметр, амперметр, стабилизированный источник питания, электрическая лампа накаливания.

Оптический пирометр состоит из зрительной трубы, миллиамперметра, реостата и источника тока. Схема устройства пирометра поясняется на рис. 3. Объектив пирометра 4 дает действительное изображение поверхности нагретого тела в месте расположения нити пирометрической лампы 3; окуляр 1 служит для рассматривания совмещенных изображений исследуемого тела и нити пирометра. Наблюдение ведется через светофильтр 2, пропускающий узкую спектральную полосу длин волн в области 660 нм. Яркость лампы изменяют, регулируя ток реостатом 6 до исчезновения ее нити на фоне излучающей поверхности (нити накаливания электрической лампы). В этот момент, соответствующий совпадению спектральной плотности энергетической светимости нити лампы пирометра 3 и исследуемого тела (спирали лампы Л) в области длины волны  $\lambda = 660$  нм, делается отсчет яркостной температуры пирометра по шкале миллиамперметра 5. Пирометр предварительно проградуирован по абсолютно черному телу, т. е. установлено, при какой силе тока в лампе спираль излучает в области  $\lambda = 660$  нм как абсолютно черное тело данной температуры. Шкала пирометра градуируется обычно в градусах Цельсия и в случае нечерного тела дает значение его яркостной температуры.

Яркостная температура тела всегда ниже его истинной термодинамической. Это связано с тем, что любое нечерное тело излучает меньше, чем абсолютно черное тело при той же температуре. Поскольку металлы в диапазоне видимых длин волн ведут себя как серые тела, то их яркостный коэффициент  $K_{\lambda}$

практически остается постоянным и почти не зависит от температуры в диапазоне 800–1800 °С. Учитывая, что яркостный коэффициент для вольфрама на  $\lambda = 0,66 \text{ мкм}$  ( $\nu \approx 4,545 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ ) примерно равен  $K_{\lambda} \approx 0,45$ , для каждого значения тока накала можно вычислить истинную температуру спирали лампы  $T_{\text{и}}$ , используя измеренную яркостную температуру  $T_{\text{я}}$ , по формуле (8):

$$T_{\text{е}} = \frac{h\nu T_{\text{я}}}{h\nu + T_{\text{я}}k \ln K_{\lambda}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 4,545 \cdot 10^{14} \cdot T_{\text{я}}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 4,545 \cdot 10^{14} + T_{\text{я}} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \ln 0,45}. \quad (9)$$

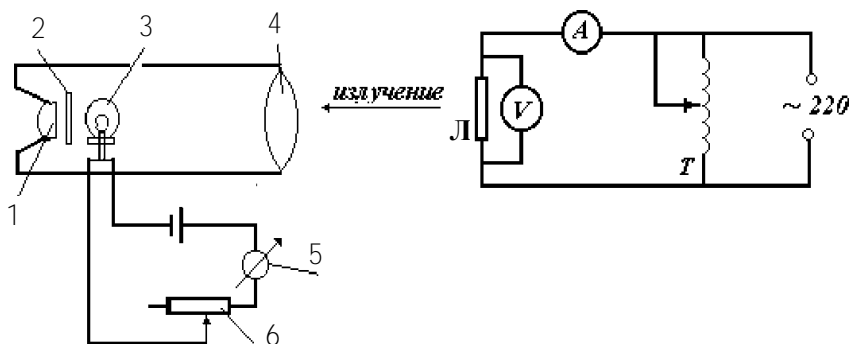


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

- 1 – окуляр зрительной трубы пирометра; 2 – светофильтр; 3 – лампа накаливания с нитью пирометра; 4 – объектив; 5 – микроамперметр;
- 6 – реостат, регулирующий силу тока через нить пирометра;
- Л – спираль лампы накаливания; Т – трансформатор

Свечение нити накала лампы обусловлено ее нагревом при прохождении электрического тока, при этом мощность  $P$ , выделяемая в нити накала лампы в виде тепла, легко определяется путем измерения силы тока, питающего лампу, и напряжения на лампе  $P = UI$ . При стационарном режиме свечения выделяемая мощность равна мощности отводимой от нити накала вследствие излучения, теплопроводности, конвекции и т. д. В первом приближении можно полагать, что основным механизмом отведения энергии от нити накала является тепловое излучение. Пренебрегая другими потерями, кроме теплового излу-

чения, разделим электрическую мощность на площадь поверхности нити накала и получим энергетическую светимость с нее:

$$R_y = \frac{UI}{S}. \quad (10)$$

Используя полученную энергетическую светимость (10) и рассчитанную по формуле (9) истинную температуру нити накала из формулы (1) можно экспериментально определить постоянную Стефана–Больцмана:

$$\sigma = \frac{R_y}{T_e^4}. \quad (11)$$

### Порядок выполнения работы

Оптический пирометр должен быть установлен перед исследуемым объектом: лампой со спиральной вольфрамовой нитью накаливания, закрытой светонепроницаемым кожухом с малым отверстием для вывода излучения от нити накала лампы. Пирометр и лампа закреплены в рейтерах на оптической скамье, при этом расстояние между ними должно быть не менее 0,7 м.

1. На источнике постоянного тока Б5-45, питающем пирометр, установить с помощью кодовых переключателей величину напряжения 2,5 В и тока 0,6 А. Включить источник Б5-45.

2. Поворотом регулировочного кольца реостата пирометра по часовой стрелке включить питание и довести накал нити пирометрической лампы до температуры 1100–1200 °С. Перед объективом пирометра установить лист белой бумаги для создания рассеянного света и перемещением тубуса окуляра добиться четкого изображения нити пирометрической лампы.

3. Включить источник постоянного тока ТЕС-7М и измерительные приборы В7-27 и Ф4214.

4. Установить ток нити лампы накаливания  $I \approx 3,2$  А. Подождать 1–2 минуты пока спираль исследуемой лампы нагреется и начнет светиться. Направить объектив оптического пирометра



на объект (спираль лампы) и перемещать тубус объектива до тех пор, пока в поле зрения не появится четкое изображение объекта (спирали) одновременно с нитью пирометрической лампы.

*Примечание. При визировании необходимо добиться такого положения, чтобы изображение объекта измерения полностью перекрывало вершину нити пирометрической лампы.*

5. Провести измерение яркостной температуры объекта. Для этого, изменяя температуру нити пирометрической лампы пирометра, поворотом кольца реостата добиться такого положения, чтобы вершина нити пирометрической лампы полностью «исчезла» на фоне изображения измеряемого объекта (спирали), т. е. добиться уравнивания яркостей нити пирометрической лампы и изображения измеряемого объекта. Необходимо иметь в виду, что нить пирометрической лампы обладает тепловой инерцией и регулировка ее накала должна производиться медленно. Отсчет измеренной температуры производится либо по показаниям встроенного гальванометра, в этом случае значения температуры сразу снимаются в градусах Цельсия, либо (в пирометрах другой конструкции) путем измерения тока через пирометрическую лампу с последующим определением температуры с помощью градуировочной таблицы.

Для получения большей точности измерений следует произвести три фотометрирования и три соответствующих измерения яркостной температуры при каждом значении силы тока, питающего лампу накаливания. Измеренные значения яркостной температуры занести в таблицу. После этого вычислить среднее значение яркостной температуры, которое следует использовать в дальнейших вычислениях постоянной Стефана–Больцмана.

6. Для каждого значения силы тока в лампе накаливания и соответствующей ей средней яркостной температуре рассчитать истинную температуру спирали по формуле (9). Рассчитанные значения занести в таблицу.

7. По формуле (11) рассчитать значения постоянной Стефана–Больцмана для каждого значения силы тока, питающего лампу. Полученные значения  $\sigma$  занести в таблицу.

8. Рассчитать среднее значение  $\sigma_{\text{ср}}$  как среднее арифметическое всех найденных значений  $\sigma$ .

9. Рассчитать погрешность, с которой измерена постоянная Стефана–Больцмана, в каждой серии измерений (при каждом значении силы тока, питающего лампу). Так как определение постоянной Стефана–Больцмана осуществляется косвенным измерением для расчета погрешности этого измерения следует продифференцировать рабочую формулу. Для этого сначала подставим в формулу (11) выражения (8) и (10), чтобы выразить в явном виде зависимость измеряемой величины  $\sigma$  от величин, измеряемых прямыми измерениями:

$$\sigma = \frac{UI(h\nu + T_{\text{я}}k \ln K_{\text{я}})^4}{S(h\nu T_{\text{я}})^4}. \quad (12)$$

Таблица

№	$I, \text{A}$	$U, \text{В}$	$P, \text{Вт}$	$t_{\text{я}}, \text{°C}$	$T_{\text{я}}, \text{К}$	$T_{\text{я ср}}, \text{К}$	$T_{\text{из}}, \text{К}$	$\sigma, \text{Вт/м}^2$	$\Delta\sigma, \text{Вт/м}^2$
1	3,2								
2	3,4								
3	3,6								
4	3,8								
5	4,0								
Среднее значение $\sigma_{\text{ср}}$ и максимальная величина $\Delta\sigma$									

Для облегчения дифференцирования формулу (12) рекомендуется предварительно прологарифмировать. После логарифмирования и дифференцирования формула для вычисления погрешности измерения постоянной Стефана–Больцмана принимает вид

$$\Delta\sigma = \sigma \left( \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} + 4 \frac{k \ln K_y \Delta T_y}{h\nu + T_y k \ln K_y} + \frac{\Delta S}{S} + 4 \frac{\Delta T_y}{T_y} \right),$$

где  $\sigma$  – значение постоянной Стефана–Больцмана, рассчитанное при одном значении силы тока и напряжения на лампе по средним значениям яркостной температуры  $T_{я\text{ ср}}$ ;

$\Delta U$ ,  $\Delta I$ ,  $\Delta T_{я}$ ,  $\Delta S$  – погрешности, с которыми измерены напряжение  $U$ , сила тока в лампе  $I$ , яркостная температура  $T_{я}$ , площадь поверхности нити накаливания лампы  $S$ .

*При расчетах площадь поверхности нити накаливания лампы брать равной  $S = (3,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ .*

10. Записать окончательный результат измерения постоянной Стефана–Больцмана в виде

$$\sigma = \sigma_{\text{нб}} \pm \Delta\sigma_{\text{max}},$$

где  $\Delta\sigma$  – наибольшая из погрешностей, полученных при измерениях постоянной Стефана–Больцмана при разной величине силы тока, питающего лампу.

### Контрольные вопросы

1. Что такое тепловое излучение?
2. Дайте определения энергетической светимости и спектральной плотности энергетической светимости. Поясните их физический смысл, связь этих величин между собой.
3. Дайте определение коэффициента монохроматического поглощения.

4. Определение абсолютно черного тела.
5. Формулировка закона Стефана–Больцмана.
6. Формулировка закона смещения Вина и второго закона Вина.
7. Формулировка закона Кирхгофа для теплового излучения.
8. Как изменяется график зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при росте температуры тела?
9. Какие методы измерения температуры используются в пирометрии? К телам, с какими спектральными характеристиками применимы эти методы?
10. Принцип работы пирометра с исчезающей нитью.
11. Какая температура называется яркостной?
12. Какая температура называется радиационной, какая цветовой?

## Литература

1. Зисман, Г. А. Курс общей физики : в 3 т. / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – М. : Наука, 1972–1974.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1985.
3. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : в 5 т. / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1977–1980.
4. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 1990.
5. Геворкян, Р. Г. Курс физики для вечерних вузов и факультетов / Р. Г. Геворкян. – М. : Высшая школа, 1979.

Учебное издание

**ИЗУЧЕНИЕ ЯРКОСТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРЫ В ОПТИЧЕСКОЙ ПИРОМЕТРИИ**

Лабораторная работа № 312

С о с т а в и т е л и :

**ХОРУНЖИЙ** Игорь Анатольевич  
**КУДИН** Вольдемар Игнатьевич  
**КОНОНОВА** Татьяна Сидоровна  
**ФЕДОТЕНКО** Анатолий Владимирович

Редактор *Т. В. Грищенкова*  
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 25.01.2013. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,22. Уч.-изд. л. 0,95. Тираж 100. Заказ 922.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.