

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 71

Изучение законов теплового излучения

1. Цель работы.....	4
2. Теоретическая часть	4
3. Экспериментальная часть.....	11
3.1. Приборы и принадлежности.....	11
3.2. Описание установки	11
3.3. Требования к технике безопасности.....	16
3.4. Выполнение работы	16
4. Контрольные вопросы	18
Список литературы.....	19

Лабораторная работа № 71

Изучение законов теплового излучения

1. Цель работы

1.1. Ознакомиться с законами теплового излучения и методом оптической пирометрии.

1.2. Исследовать зависимость излучательности тела от температуры.

1.3. Определить постоянную Стефана-Больцмана.

1.4. Определить постоянную Планка.

2. Теоретическая часть

Тепловое излучение – это электромагнитное излучение, испускаемое нагретым веществом и возникающее за счет его внутренней энергии (в отличие, например, от люминесценции, возбуждаемой внешними источниками энергии).

Тепловое излучение испускается нагретым телом, находящимся в термодинамическом равновесии с окружающей средой, и является равновесным процессом, т.е. процессом, характеризующимся очень медленным изменением термодинамических параметров состояния (всякий равновесный процесс является обратимым процессом и, наоборот, любой обратимый процесс является равновесным).

Тепловое излучение имеет сплошной спектр, положение максимума которого зависит от температуры вещества. С ее повышением возрастает общая энергия испускаемого теплового излучения, а максимум смещается в область малых длин волн.

Количественными характеристиками теплового излучения служат:

а) спектральная плотность энергетической светимости $r_{\lambda,T}$ – мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале длин волн единичной ширины

$$r_{\lambda,T} = \frac{dW_{\lambda,\lambda+\Delta\lambda}^{\text{изл}}}{d\lambda}, \quad (2.1)$$

где $dW_{\lambda,\lambda+\Delta\lambda}^{\text{изл}}$ – энергия электромагнитного излучения, испускаемого за единицу времени (мощность излучения) с единицы

площади поверхности нагретого до температуры T тела в интервале длин волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$;

б) излучательность или энергетическая светимость (интегральная излучательность) R_λ – энергия электромагнитного излучения, испускаемого за единицу времени (мощность излучения) с единицы площади поверхности тела *на всех длинах волн*

$$R_\lambda = \int_0^\infty r_{\lambda,T} d\lambda; \quad (2.2)$$

в) спектральная поглощательная способность $A_{\lambda,T}$ (коэффициент поглощения), показывающая, какая часть энергии электромагнитных волн с длиной от λ до $\lambda + \Delta\lambda$, падающих за единицу времени на единицу площади поверхности тела, поглощается телом

$$A_{\lambda,T} = \frac{dW_{\lambda,\lambda+d\lambda}^{\text{погл}}}{dW^{\text{пад}}}. \quad (2.3)$$

Тело, способное поглощать полностью все падающее на него излучение любой длины волны, называются абсолютно черным (АЧТ), для него $A_{\lambda,T} = 1$ для всех длин волн. Необходимо обратить внимание на то, что в этом определении АЧТ говорится только о поглощении и ничего о его излучении.

Абсолютно черных тел в природе нет, наиболее близким приближением к АЧТ является малое отверстие в замкнутой полости сферической формы, стенки которой зачернены (луч, вошедший в полость, многократно отражаясь внутри неё от стенок и частично поглощаясь при этом, обратно не выходит, т.е. не отражается, следовательно, коэффициент поглощения у этого малого отверстия равен 1, что соответствует понятию АЧТ) рис. 2.1.

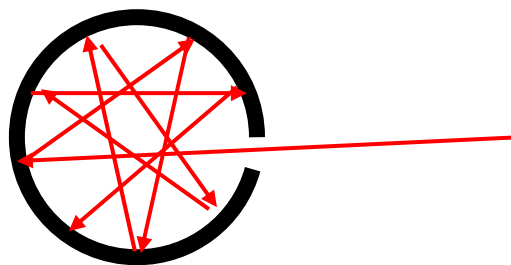


Рис. 2.1

Близким к единице коэффициентом поглощения обладает сажа, черный бархат, платиновая чернь. Излучение АЧТ не зависит от природы вещества из которого оно сделано и определяется лишь его

температурой.

Наряду с понятием черного тела используют понятие *серого* тела – тела, поглощательная способность которого меньше единицы, но одинакова для всех длин волн и зависит только от температуры, материала и состояния поверхности тела, т.е. для него $A_{\lambda,T} = A_T < 1$ (рис. 2.2).



Рис. 2.2

Тепловое излучение любых тел подчиняется закону Кирхгофа: для любых тел отношение излучательной способности к поглощательной не зависит от длины волны λ излучения и температуры T и есть величина постоянная

$$\frac{r_{\lambda,T}}{A_{\lambda,T}} = \text{const} . \quad (2.4)$$

Т.к. для АЧТ $A_{\lambda,T} = 1$, то эта константа равна спектральной плотности излучательной способности АЧТ $r_0(\lambda, T)$

$$\frac{r_{\lambda,T}}{A_{\lambda,T}} = r_0(\lambda, T) . \quad (2.5)$$

Распределение энергии излучения абсолютно черного тела по длинам волн при разных температурах тела показано на рис. 2.3.

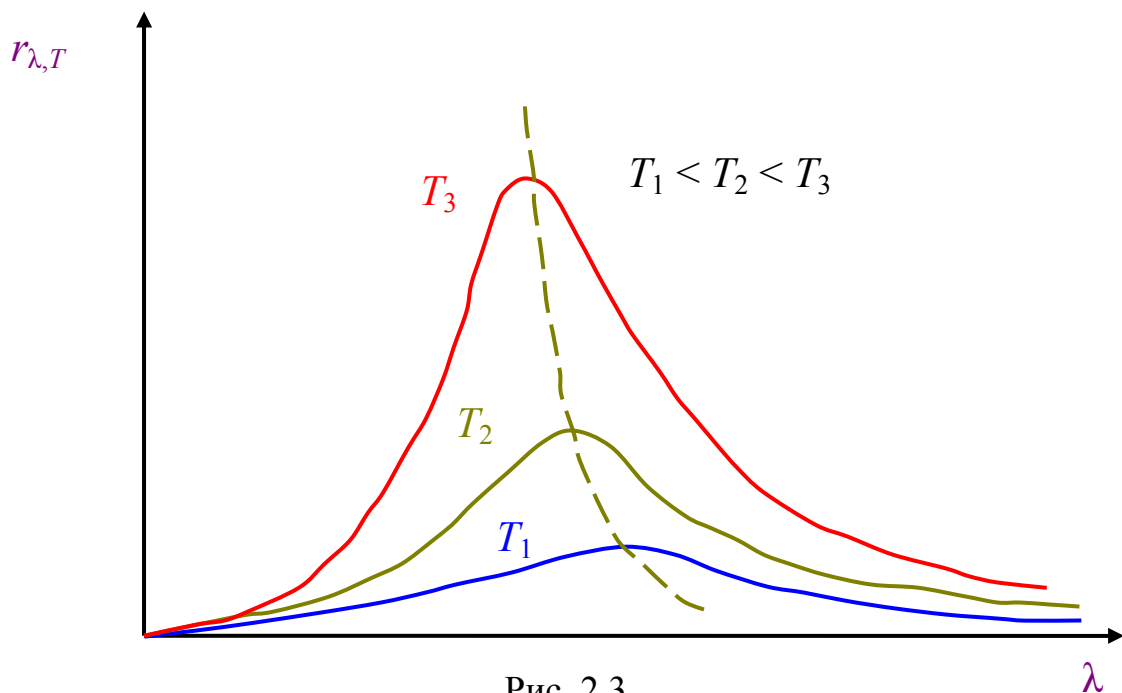


Рис. 2.3

Площадь, ограниченная каждой кривой, определяет полную энергетическую светимость

$$R_{\lambda} = \int_0^{\infty} r_0(\lambda, T) d\lambda \quad (2.6)$$

Анализ экспериментально полученных зависимостей, представленных на рис. 2.3, позволил сформулировать законы теплового излучения АЧТ:

а) 1-й закон (закон Стефана-Больцмана): энергетическая светимость абсолютно черного тела R_{λ} пропорциональна четвертой степени температуры T

$$R_{\lambda} = \sigma T^4, \quad (2.7)$$

где $\sigma = 5,674 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$ – постоянная Стефана-Больцмана;

б) 1-й закон Вина: длина волны λ_m , на которую приходится максимум спектрального распределения излучательности АЧТ, обратно пропорционален температуре

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \text{ где } b = 1,29 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \text{К}^5}; \quad (2.8)$$

в) 2-й закон Вина: максимальное значение спектральной плотности излучательности АЧТ $\varepsilon_0(\lambda, T)$ пропорционально пятой степени температуры

$$r_0(\lambda, T)_{\max} = r_0(\lambda_{\max}, T) = b' T^5. \quad (2.9)$$

Смысл величин, входящих в эти законы, поясняется рис. 2.4.

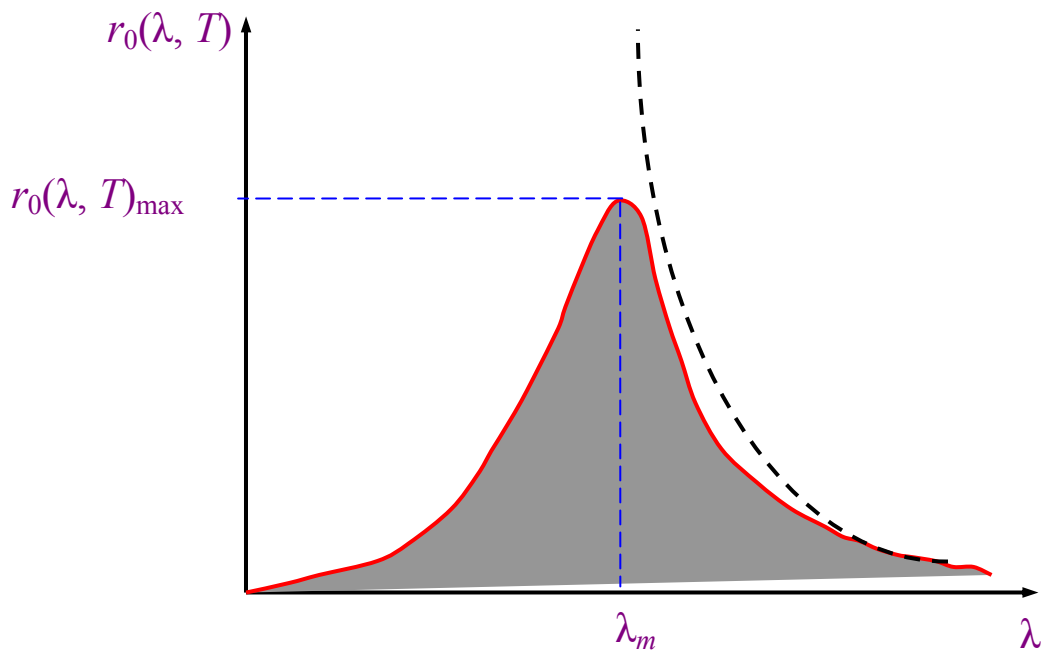


Рис. 2.4

Попытки объяснить ход экспериментальных кривых (рис. 2.3) на основе законов классической физики оказались безуспешными, они приводили к зависимости вида (формула Рэля-Джинса)

$$r_0(\lambda, T) = \frac{2 h c}{\lambda^4} R T. \quad (2.10)$$

Эта зависимость согласуется с экспериментальными данными только в области больших длин волн и высоких температур, в области малых длин волн наблюдается резкое расхождение с экспериментом (пунктир на рис. 2.4). В рамках классической физики не удалось объяснить законы распределения энергии в спектре черного тела. Один из основоположников современной физики Пауль Эренфест (1880 - 1933) назвал такой вывод «ультрафиолетовой катастрофой» (при уменьшении длины волны, т.е. при смещении в ультрафиолетовую область спектра, согласно законам классической физики, интенсивность теплового излучения должна возрасти до бесконечности, что противоречит эксперименту).

Получить теоретическую зависимость спектральной плотности энергетической светимости черного тела от λ и T , которая согласуется с ходом экспериментальных кривых, удалось в 1900 году М. Планку путём отказа от представлений классической физики о непрерывном изменении энергии и гипотезы о том, что тела могут излучать и

поглощать энергию порциями – квантами, кратными по величине $h\nu$, где h – квант действия, получивший в дальнейшем название постоянной Планка, ν – частота электромагнитного излучения (квантовая гипотеза Планка). Закон излучения Планка имеет вид

$$r_0(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T}\right) - 1}, \quad (2.11)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, λ – длина волны излучения.

Формула Планка позволяет вывести теоретические законы излучения АЧТ и связать постоянную h с экспериментальной постоянной Стефана-Больцмана σ , постоянными b и b' Вина и постоянной Больцмана k ;

а) закон Стефана-Больцмана

$$R_0 = \int_0^\infty r_0(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi^5 \cdot k^4}{15c^2 \cdot h^3} \cdot T^2; \quad (2.12)$$

б) 1-й закон Вина. Положение максимума находится из условия

$$\frac{\partial r_0(\lambda, T)}{r_0 \lambda} = 0. \quad (2.13)$$

Подставляя (2.11) в (2.13), получаем.

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{4,965 k} \cdot \frac{1}{T}; \quad (2.14)$$

или $\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$, где $b = 1,29 \cdot 10^{-3}$ м·К.

в) 2-й закон Вина. Подставляя (2.14) в (2.11), получаем

$$r_0(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot k^5 T^2}{h^4 c^3 (e^{4,965} - 1)}. \quad (2.15)$$

Законы излучения абсолютно черных тел легли в основу пирометрии – оптических бесконтактных методов определения температуры, основанных на измерении интенсивности теплового излучения тел. Поскольку интенсивность теплового излучения резко убывает с уменьшением температуры тел, методы оптической пирометрии применяют для измерения относительно высоких температур. При $T \leq 1000^\circ\text{C}$ они играют второстепенную роль, при

$T \geq 1000^{\circ}\text{C}$ становятся главными, а при $T > 3000^{\circ}\text{C}$ – практически единственными методами измерения температуры. Связано это с тем, что методы пирометрии не требуют контакта датчика измерительного прибора с телом, температура которого измеряется. Основное условие применимости оптической пирометрии – излучение тела должно быть чисто тепловым, т.е. должно подчиняться закону излучения Кирхгофа. Твердые тела и жидкости при высоких температурах обычно удовлетворяют этому требованию, в случае же газов и плазмы необходима проверка его выполнения.

К недостаткам методов оптической пирометрии следует отнести трудоемкость измерений, зачастую сложность интерпретации результатов и невысокую точность (например, относительные погрешности измерений температуры плазмы в лучших случаях составляет $3 \div 10\%$).

В настоящей работе измерение температуры тела производится с помощью яркостного оптического пирометра с исчезающей нитью, обеспечивающего наибольшую точность в диапазоне температур от 10^3 до 10^4 К. Этот метод основан на визуальном сравнении квазимохроматических яркостей эталона и изображения раскалённого тела, которое принимается за абсолютно черное. В качестве эталона яркости в оптическом пирометре используется пирометрическая лампа, для которой известна зависимость температуры нити от тока, протекающего по ней. Изображение источника излучения, температуру которого хотят измерить, с помощью объектива проецируется в плоскость пирометрической лампы. Наблюдатель, смотрящий в окулярный микроскоп, видит нить пирометрической лампы на фоне изображения источника излучения. Температура определяется по величине тока, протекающего по нити пирометрической лампы в момент уравнивания яркостей нити и изображения тела.

Если исследуемое тело не является абсолютно черным, то найденная таким образом температура называется яркостной. Яркостная температура тела всегда ниже истинной термодинамической температуры, так как любое тело излучает меньше, чем абсолютно черное тело при той же температуре, что следует из закона Кирхгофа. Следовательно, нечерное тело, имеющее одинаковую яркость с чёрным телом для определенной длины волны, имеет истинную термодинамическую температуру выше температуры

черного тела. На рис. 2.5 приведена зависимость разницы ΔT между термодинамической и яркостной температурой $T_{\text{я}}$ вольфрамовой нити. Зная яркостную температуру и поправку ΔT можно найти истинную термодинамическую температуру черного тела.

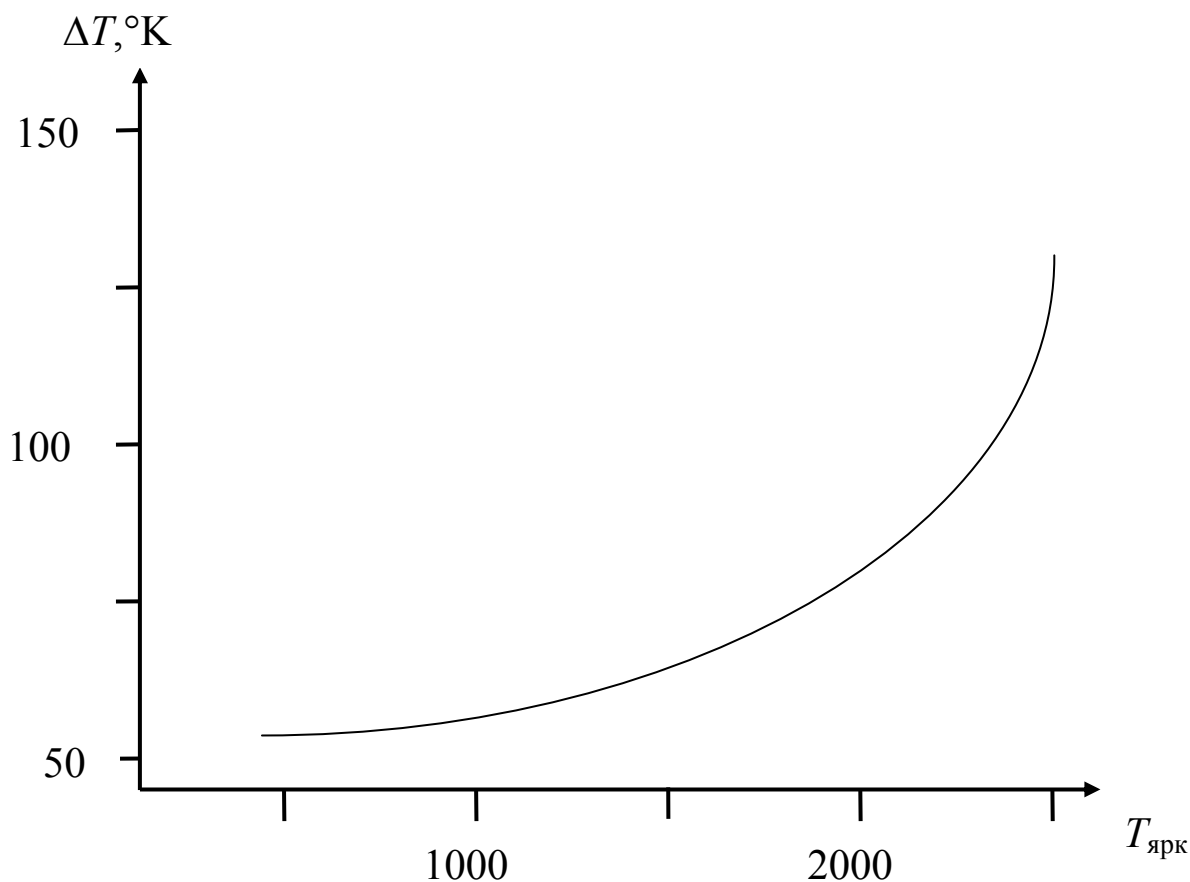


Рис. 2.5

3. Экспериментальная часть

3.1. Приборы и принадлежности

- оптический пирометр ЛОП-72 с блоком питания и измерительным блоком;
- лампа накаливания с вольфрамовой нитью;
- регулируемый блок питания лампы накаливания с миллиамперметром и вольтметром;

3.2. Описание установки

В работе используется пирометр ЛОП-72, позволяющий измерять температуру от 900 до 6000°C. Общий вид пирометра показан на рис. 3.1.

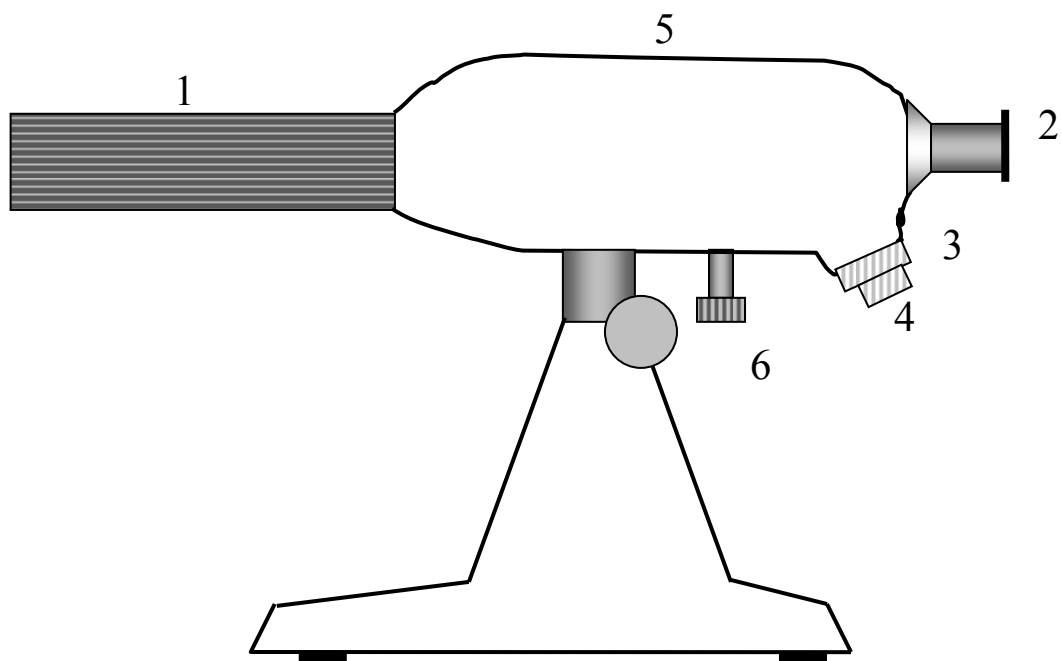


Рис. 3.1

Оптический пирометр ЛОП-72 представляет собой телескоп, состоящий из объектива и окулярного микроскопа 2, оправы которых закреплены в корпусе пирометра 5, в котором помещены пирометрическая лампа, светофильтр и реостат (рис. 3.2), имеющий ручки грубой 4 и тонкой 3 и регулировки (рис. 3.1). Для реостата указано направление вращения ручек, соответствующее увеличению тока пирометрической лампы. Реостат позволяет установить ток в интервале от 0,3 до 0,6 А с точностью 10 мкА. Для получения четкого изображения объектов, расположенных на различных расстояниях от прибора, вращением наружного кольца 1 объектив пирометра перемещается вдоль оптической оси. Перемещение окуляра микроскопа 2 позволяет добиться четкого изображения нити пирометрической лампы. Юстировочное устройство 6 позволяет правильно устанавливать пирометрическую лампу.

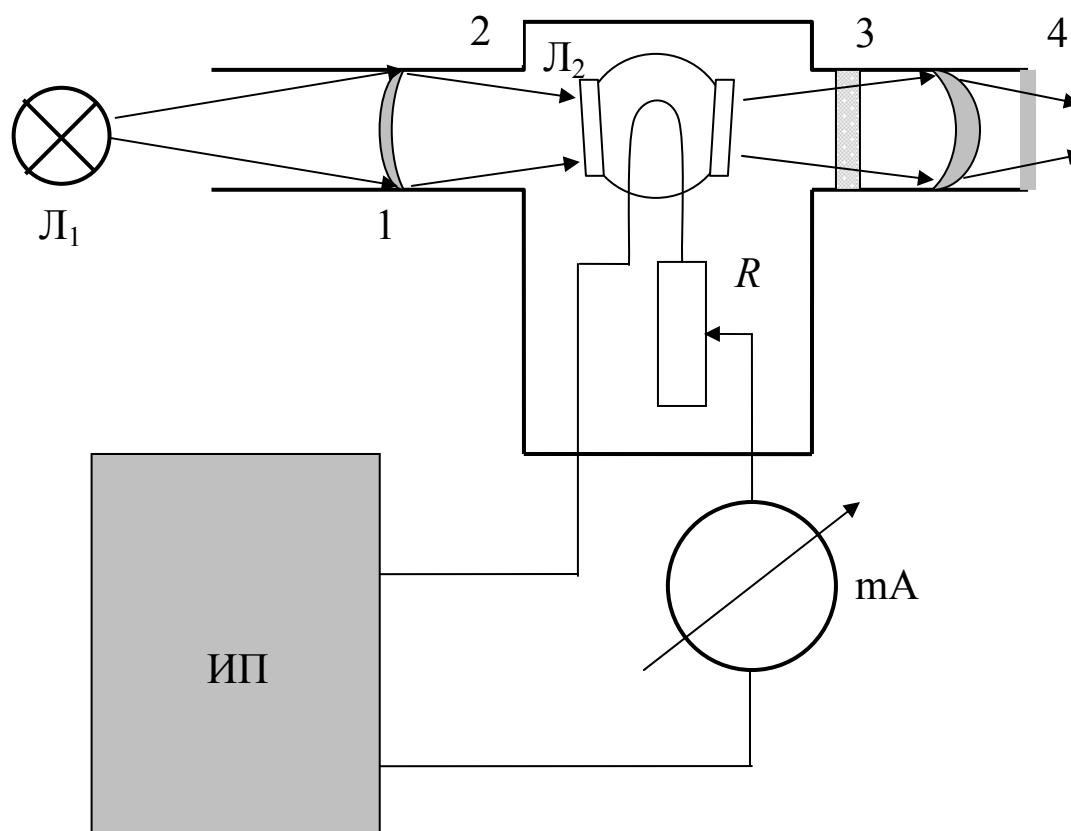


Рис. 3.2

Лампа пирометра питается от специального стабилизированного источника питания ИП. Ток накала нити пирометрической лампы измеряется миллиамперметром. Объектив 1 дает действительное изображение исследуемого тела (лампа L_1) в плоскости нити пирометрической лампы L_2 . Изображение тела и нити лампы L_2 одновременно рассматривается через окуляр 4, которым служит стандартный измерительный микроскоп. Микроскоп обеспечивает четкое изображение нити пирометрической лампы, имеющей скошенные окна. Дугообразная вольфрамовая нить лампы диаметром 100 мкм с одной стороны сошлифована на половину диаметра и обращена этой стороной к наблюдателю. Перед окуляром 4 расположен светофильтр 3, максимум пропускания которого приходится на длину волны $(0,65 \pm 0,01)$ мкм.

В данной работе исследуется лампа накаливания L_1 (рис. 3.2) с вольфрамовой нитью. Ток накала лампы L_1 регулируется тиристорным регулятором (рис. 3.3). Напряжение на лампе и ток через нее измеряются вольтметром и миллиамперметром, установленными в одном корпусе с блоком питания лампы.

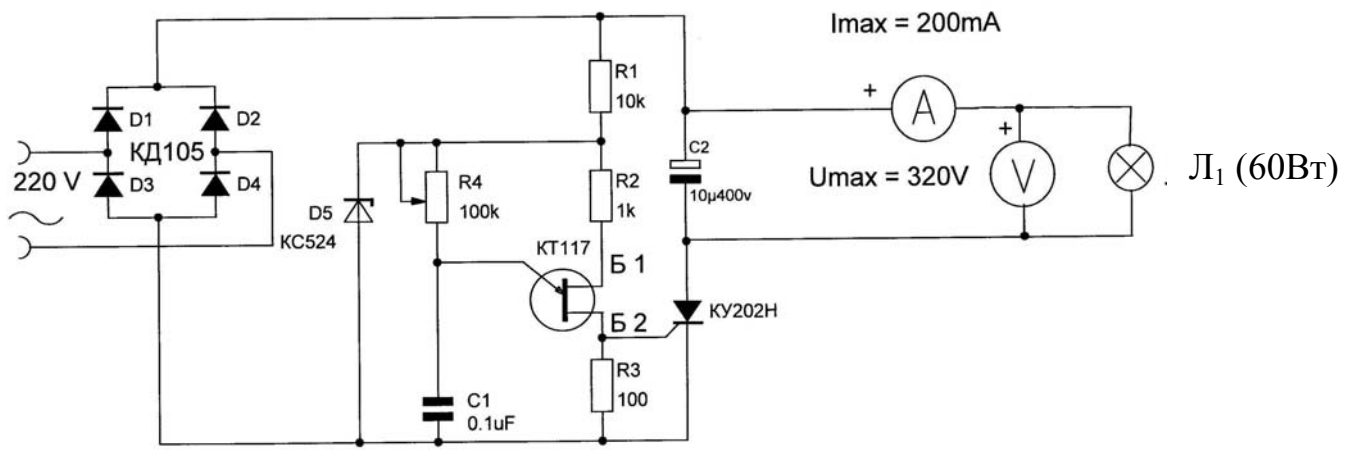


Рис. 3.3

В установившемся режиме (когда $T = \text{const}$) мощность W_2 , рассеиваемая вольфрамовой нитью лампы в пространство, должна быть равна излучаемой ею мощности. Мощность, потребляемая нитью, состоит из электрической мощности W_3 , получаемой от источника электропитания (сеть), и мощности W_1 поглощаемого нитью теплового излучения окружающих тел, всегда присутствующего в пространстве, поскольку температура этих тел выше 0°K и равна комнатной T_1

$$W_2 = W_3 + W_1. \quad (3.1)$$

Электрическая мощность W_3 исследуемой лампы рассчитывается по формуле

$$W_3 = I \cdot U, \quad (3.2)$$

где I и U соответственно ток через исследуемую лампу и падение напряжения на ней.

Мощность W_1 определяется как

$$W_1 = \alpha_0 \cdot \sigma \cdot T_1^4 \cdot S, \quad (3.3)$$

где S – поверхность вольфрамовой нити; α_0 – коэффициент поглощения (поскольку нить не является абсолютно черным телом $\alpha_0 < 1$).

Мощность W_2 , которую излучает нить в окружающее пространство, согласно закону Стефана-Больцмана, определяется как

$$W_2 = \alpha_1 \cdot \sigma \cdot T_2^4 \cdot S, \quad (3.4)$$

где T_2 – температура нити; α_1 – постоянный коэффициент ($\alpha_1 \leq 1$, т.к. нить не является АЧТ).

Тогда из (3.1), (3.2), (3.3) и (3.4) получаем

$$I U = \sigma (\alpha_1 \cdot T_2^4 - \alpha_0 \cdot T_1^4) \cdot S. \quad (3.5)$$

Однако $T_1^4 \ll T_2^4$ поэтому (3.5) можно приближенно записать в виде

$$W = I \cdot U = \alpha_1 \cdot \sigma \cdot T_2^4 \cdot S, \quad (3.6)$$

откуда
$$\sigma = \frac{IU}{\alpha_1 \cdot T_2^4 \cdot S}, \quad (3.7)$$

$\alpha_1 = 0,43$ (для вольфрамовой нити), $S = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

Таблица 1

Градуировочный график пирометра ЛОП-72

$I, \text{ mA}$	75	300	350	400	450	500	550	600
$T_{\text{ярк}}, \text{ K}$	1200	1240	1303	1364	1428	1488	1552	1618

Если значения I , полученного в эксперименте, нет в табл. 1, то $T_{\text{ярк}}$ находим, используя линейную аппроксимацию. Пусть измеренный ток пирометрической лампы I , а I_1 и I_2 два значения тока, меньше и больше измеренного значения I , которые есть в табл. 1 (значение I лежит между значениями I_1 и I_2). Тогда искомая яркостная температура $T_{\text{ярк}}$ будет

$$T_{\text{ярк}} = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{I_2 - I_1} (I - I_1), \quad (3.8)$$

здесь T_1 и T_2 – значения яркостных температур из таблицы 1 при токах пирометрической лампы I_1 и I_2 .

Таблица 2

Температурная поправка ΔT , К

$\Delta T, \text{ K}$	$T_{\text{ярк}}, \text{ K}$
52	1180
52,5	1200
53,6	1250
55,0	1300
57,2	1350
59,7	1400
62,0	1450
64,4	1500
66,8	1550
69,4	1600
72,3	1650
74,8	1700

Если значения $T_{\text{ярк}}$, полученного в эксперименте, нет в табл. 2, то найти искомую температурную поправку ΔT можно, используя линейную аппроксимацию. Пусть $T_{\text{я1}}$ и $T_{\text{я2}}$ – значения яркостной температуры, которые есть в табл. 2. (измеренное значение $T_{\text{ярк}}$ находится между ними, причём $T_{\text{я1}} < T_{\text{ярк}} < T_{\text{я2}}$). Искомое значение ΔT будет

$$\Delta T = \Delta T_1 + \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{T_{\text{я2}} - T_{\text{я1}}} (T - T_{\text{я1}}) \quad (3.9)$$

здесь ΔT_1 и ΔT_2 – значения температурных поправок, соответствующие $T_{\text{я1}}$ и $T_{\text{я2}}$.

3.3. Требования к технике безопасности

При выполнении работы необходимо:

- 1) внимательно ознакомиться с заданием и оборудованием;
- 2) проверить заземление лабораторной установки и изоляцию токоведущих проводов, о замеченных неисправностях немедленно сообщить преподавателю;
- 3) не загромождать рабочее место посторонними предметами;
- 4) не оставлять без присмотра включенную лабораторную установку;
- 5) по окончании работы отключить установку от сети и привести в порядок свое рабочее место.

3.4. Выполнение работы

Для выполнения работы необходимо:

- 1) включить блок питания лампы и блок питания пирометра в сеть;
- 2) установить в блоке питания исследуемой лампы на минимальное напряжение (тёмно-красное свечение лампы);
- 3) включить тумблер на блоке питания пирометра;
- 4) вращением ручки 4 пирометра (рис. 3.1) добиться красного свечения нити пирометрической лампы;
- 5) перемещая окуляр 2 (рис. 3.1) добиться резкого изображения нити пирометрической лампы;
- 6) вращая окуляр 2, добиться резкого изображения нити пирометрической лампы;

7) навести пирометр на нить исследуемой лампы и, вращая кольцо 1 объектива пирометра (рис. 3.2), добиться четкого изображения нити исследуемой лампы. При этом изображение обеих нитей должно быть одинаково четким, при этом будет наблюдаться картина, показанная на рис. 3.4;

8) вращением ручки потенциометра R_4 (рис. 3.3) установить минимальную яркость исследуемой лампы, при которой она еще видна через пирометр. Снять показания вольтметра U и миллиамперметра I на её блоке питания. Данные занести в табл 3.;

9) вращением ручки 4 и 3 пирометра (рис. 3.2) уравнивать яркости нити пирометрической лампы и изображения исследуемой нити;

10) снять показания амперметра, регистрирующего ток через пирометрическую лампу $I_{\text{пир}}$. Измерения провести не менее трех раз. К моменту уравнивания яркостей подходить то со стороны большей, то со стороны меньшей яркости пирометрической лампы по отношению к яркости нити исследуемой лампы. Данные занести в табл. 3.

Таблица 3

I , А	U , В	W , Вт	$I_{\text{пир}}$, А	T_2 , К	$T_{2 \text{ ср}}$, К	ΔT , К	T , К	σ , Вт · м ² · К ⁴

11) по графику зависимости температуры нити пирометрической лампы от тока через нее определить температуру $T_{\text{я}}$;

12) пользуясь табл. 1 и 2, найти ΔT и T

$$T = T_{\text{я}} + \Delta T;$$

13) вращением ручки автотрансформатора установить яркость исследуемой лампы близкую к максимальной и повторить измерения пп. 8-12;

14) повторить измерения пп. 8-12 для трех произвольных значений яркости, промежуточных между минимальной и максимальной;

15) найти постоянную Стефана-Больцмана по формуле

$$\sigma = \frac{I U}{\alpha \cdot T^4 \cdot S};$$

16) найти $\sigma_{\text{ср}}$ и погрешность $\Delta\sigma$

$$\sigma = \sigma_{\text{ср}} \pm \Delta\sigma;$$

17) определить постоянную Планка h по формуле

$$h = 3 \sqrt[3]{\frac{2\pi^5 \cdot \kappa^4}{15c^2 \cdot \sigma}};$$

18) найти $h_{\text{ср}}$ и погрешность Δh из $h = h_{\text{ср}} \pm \Delta h$;

19) по измеренным оптическим пирометром значениям температуры вычислить длины волн λ_{max} спектральной плотности излучательной способности абсолютно черного тела при этих температурах, используя закон смещения Вина (2.8)

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

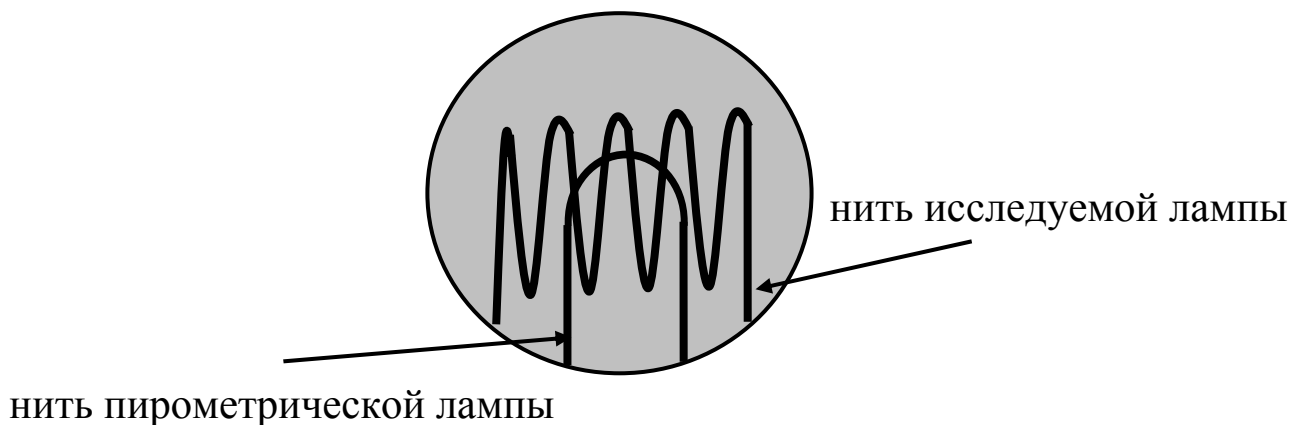


Рис. 3.4

4. Контрольные вопросы

1. Какое излучение называется равновесным?
2. Что такое энергетическая светимость, монохроматическая излучательная и поглощательная способность?
3. Сформулируйте закон Кирхгофа для теплового излучения.
4. Сформулируйте законы теплового излучения абсолютно черного тела.
5. Объясните, в чем различие классического и квантового

подхода к объяснению излучения нагретых тел?

6. Объясните, почему при нагревании металла его цвет изменяется от черного до белого (от красного до голубого)?

7. Почему окна домов днем с улицы кажутся черными? Оцените λ_{\max} для абсолютно черного тела при комнатной температуре.

8. Что понимается под термином «ультрафиолетовая катастрофа»?

9. Объясните физические основы оптической пирометрии и устройство использованного в данной работе пирометра.

10. Пользуясь законами теплового излучения, объясните, какие тела быстрее остывают и почему – черные или белые?

11. Определите длину волны λ_m , на которую приходится максимум кривой спектрального распределения излучения нити лампы Л₁ при одном из измеренных значений температуры.

Список литературы

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. т. 5. – М.: Наука. 1998.
2. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики: учебное пособие для втузов. – 5-е изд., – М.: ACADEMIA, 2005.
3. *Трофимова Т.И.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 1998.
4. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики, т. IV, Оптика. – М.: Физматлит, 2005.