

Лабораторная работа № 1

ПРОВЕРКА ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: проверка основных законов теплового излучения, определение постоянной Стефана – Больцмана, постоянной Планка, удельной мощности лампы накаливания.

Методические указания

Излучение электромагнитных волн, возникающее за счет внутренней (тепловой) энергии излучающего объекта, называется тепловым излучением. Все остальные виды излучения, возбуждаемые за счет любого другого вида энергии, кроме тепловой, объединяются под общим названием «люминесценция». Понятие «тепловое излучение» применимо только к излучению объекта (тела), состоящего из большого числа атомов или молекул, т. е. когда это тело является макрообъектом. Тепловое излучение присуще нагретым телам вне зависимости от их природы и агрегатного состояния.

Тепловое излучение характеризуется сплошным спектром, положение максимума которого зависит от температуры (рис. 1).

Если тело путем излучения теряет столько же энергии, сколько поглощает, то процесс излучения называется равновесным. При этом нагретое тело находится в термодинамическом равновесии с окружающей средой, а его состояние может быть охарактеризовано определенной температурой.

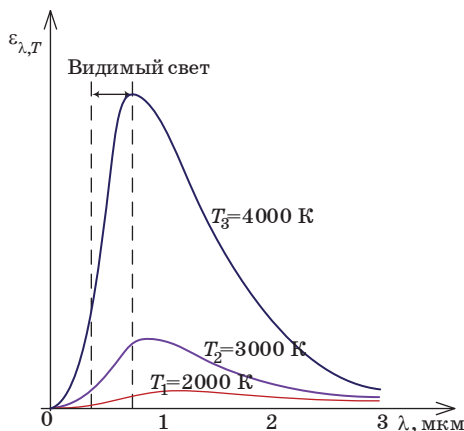


Рис. 1

Мощность R , излучаемую с единицы поверхности нагретого тела во всех направлениях во всем диапазоне частот, называют интегральной энергетической светимостью или интегральной излучательной способностью тела. Мощность dR , испускаемая с единицы поверхности нагретого тела в интервале частот от ν до $\nu+d\nu$, пропорциональна величине интервала $d\nu$

$$dR = r_{\nu,T} d\nu, \quad r_{\nu,T} = \frac{dR}{d\nu}, \quad (1.1)$$

где $r_{\nu,T}$ – спектральная плотность энергетической светимости или спектральная излучательная способность тела.

Интегральная энергетическая светимость связана со спектральной излучательной способностью тела соотношениями

$$R = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu$$

или

$$R = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda, \quad r_{\lambda,T} = \frac{dR}{d\lambda}. \quad (1.2)$$

Все тела в той или иной степени поглощают энергию падающих на них электромагнитных волн. Спектральной характеристикой поглощения является спектральная поглощательная способность тела $a_{\nu,T}$, которая определяет долю поглощенной энергии в интервале частот от ν до $\nu+d\nu$

$$a_{\nu,T} = \frac{dW'_{\nu}}{dW_{\nu}}, \quad (1.3)$$

где dW_{ν} – энергия излучения, падающего на тело в интервале частот от ν до $\nu+d\nu$; dW'_{ν} – часть этой энергии, поглощенная телом.

Законы, которым подчиняется тепловое излучение

Закон Кирхгофа. Отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности одинаково для всех тел и является универсальной функцией частоты и температуры $f(\nu, T)$:

$$\left(\frac{r_{\nu,T}}{a_{\nu,T}} \right)_1 = \left(\frac{r_{\nu,T}}{a_{\nu,T}} \right)_2 = \dots = f(\nu, T), \quad (4)$$

где индексы 1, 2,... относятся к разным телам.

Тело, которое поглощает все падающее на него излучение, называют абсолютно черным (АЧТ). В природе не существует абсолютно чёрных тел. Тела, покрытые сажей или платиновой чернью, приближаются по своим свойствам к абсолютно черным лишь в ограниченном интервале

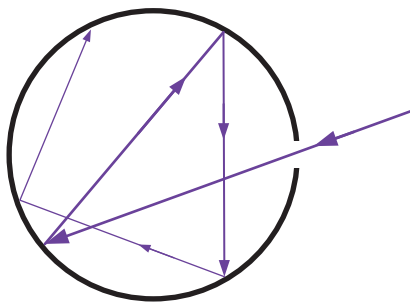


Рис. 2

длин волн. Наиболее совершенной моделью черного тела может служить небольшое отверстие в непрозрачной стенке замкнутой полости (рис. 2).

Луч света, попадающий внутрь через отверстие, претерпевает многократные отражения от стенок полости, прежде чем он выйдет обратно. При каждом отражении происходит частичное поглощение энергии света стенками. Поэтому независимо от материала стенок интенсивность света, выходящего из полости через отверстие, во много раз меньше интенсивности падающего извне первичного излучения. Эта модель тем ближе по характеристикам к чёрному телу, чем больше отношение площади поверхности полости к площади отверстия.

Поглощательная способность абсолютно черного тела равна единице при любой частоте и температуре, $a_{v,T}=1$.

Из (4) следует, что функция Кирхгофа $f(v,T)$ равна излучательной способности абсолютно черного тела

$$f(v,T) = (r_{v,T})_{\text{АЧТ}} = \varepsilon_{v,T}. \quad (5)$$

Закон Стефана – Больцмана. Интегральная энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры

$$R = \sigma T^4, \quad (6)$$

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

Реальные тела не являются абсолютно черными и их поглощательная способность меньше единицы. Поэтому энергетическая светимость нечерного тела R меньше энергетической светимости абсолютно черного тела

$$R = \int_0^{\infty} a_{v,T} \varepsilon_{v,T} dt = a \int_0^{\infty} \varepsilon_{v,T} dt = a \sigma T^4, \quad (7)$$

где a – среднее значение поглощательной способности тела по всему спектральному интервалу.

Закон Вина. Длина волны излучения λ_m , соответствующая максимуму спектральной излучательной способности абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре тела

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (8)$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Значение излучательной способности абсолютно черного тела в максимуме $\varepsilon_{\lambda m}$ пропорционально пятой степени абсолютной температуры

$$\varepsilon_{\lambda m} = CT^5, \quad (9)$$

где $C = 1,29 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$.

В 1900 году М. Планк, исходя из квантовых представлений о природе излучения, нашел аналитическое выражение для функции излучательной способности АЧТ

$$\varepsilon_{\nu, T} = \frac{2\pi h}{c^2} \cdot \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad \varepsilon_{\lambda, T} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}, \quad (10)$$

где h – постоянная Планка ($h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$); c – скорость света в вакууме, k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}$).

Зависимость $\varepsilon_{\lambda, T}$ от длины волны для разных температур приведена на рис. 1.

Зная функцию распределения Планка, можно получить закон Стефана – Больцмана, подставив функцию (10) в формулу (2), и найти значение постоянной σ . Закон смещения Вина легко получить из формулы Планка, исследуя функцию $\varepsilon_{\lambda, T}$ на экстремум.

Описание лабораторной установки

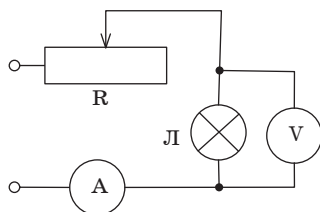


Рис. 3

В работе исследуется тепловое излучение вольфрамовой нити лампы накаливания. Электрическая схема включения лампы приведена на рис. 3, где L – исследуемая лампа; A – амперметр; V – вольтметр; R – реостат.

Измерения температуры нити лампы производят неконтактным способом с помощью оптического пиро-

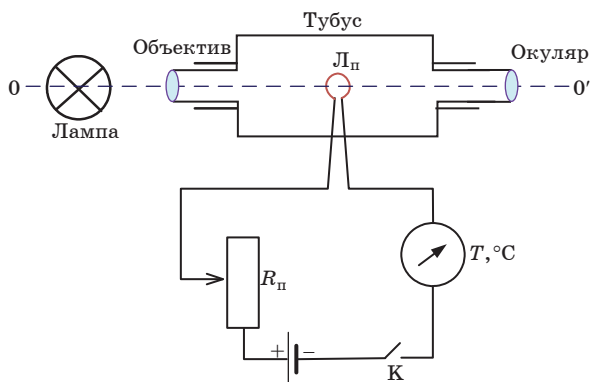


Рис. 4

метра, схема которого представлена на рис. 4. Прибор состоит из тубуса, внутри которого находится лампа накаливания $Л_{п}$ с тонкой вольфрамовой нитью, и двух оптических систем – объектива и окуляра. Нить лампы пирометра $Л_{п}$ нагревается электрическим током. Величина тока, а, следовательно, и температура нити лампы $Л_{п}$ регулируется реостатом $R_{п}$. Пирометр имеет прибор, который измеряет силу тока, протекающего через нить. Он проградуирован в шкале температур в градусах Цельсия.

Нить лампы расположена в плоскости, перпендикулярной оси прибора $00'$. С помощью объектива в той же плоскости можно получить изображение нити исследуемого источника излучения. Наблюдая оба источника излучения, внешний и внутренний, через окуляр со светофильтром красного цвета ($\lambda = 0,65$ мкм) и регулируя силу тока нити лампы пирометра (при нажатой кнопке K в цепи накала лампы), можно добиться одинаковой яркости свечения нити исследуемой лампы и нити лампы пирометра. При достижении одинаковой яркости прибор пирометра покажет значение яркостной температуры $T_{я}$ исследуемого объекта. Истинная (термодинамическая) температура T нити исследуемой лампы связана с яркостной температурой $T_{я}$ соотношением

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{я}} + \frac{\lambda}{c} \ln a, \quad (11)$$

где $c = 1,44 \cdot 10^{-2}$ м·К; $\lambda = 0,65$ мкм; $a = 0,4$ – поглощательная способность вольфрама.

Порядок выполнения работы

1. Проверка закона Стефана – Больцмана

Для вольфрамовой нити лампы накаливания, не являющейся абсолютно черным телом, закон Стефана – Больцмана дается выражением (7). При протекании электрического тока в цепи накала лампы имеются потери тепловой энергии нити на теплоотвод и из-за наличия активного сопротивления токоведущих проводов. Поэтому в тепловое излучение преобразуется лишь некоторая часть α электрической мощности P , расходуемой на накал нити. С учетом потерь выражение (7) может быть переписано в виде

$$\alpha P = a\sigma T^4 S, \quad (12)$$

где S – площадь излучающей поверхности.

Проверка закона состоит в получении опытного значения показателя степени температуры в формуле (12) и значения постоянной Стефана – Больцмана. Для этого:

1.1. Собирают электрическую схему (рис. 2). Устанавливают наименьшее значение напряжения, при котором наблюдается свечение нити лампы.

1.2. При неизменном значении тока и напряжения измеряют яркостную температуру $T_{\text{я}}$ нити лампы. Измерение яркостной температуры проводят пять раз при каждом значении силы тока. Затем увеличивают силу тока в цепи накала лампы и измеряют снова пять раз соответствующую яркостную температуру. Всего значений тока, при которых производятся измерения $T_{\text{я}}$, должно быть не менее 4–5.

Результаты измерений U , I и $T_{\text{я}}$ заносят в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	U , В	I , А	P , Вт	$\ln P$	$T_{\text{я}}$, К	T , К	$\ln T$	T^4 , К ⁴	σ , Вт/(м ² ·К ⁴).
1									
2									
3									

1.3. Для каждого значения мощности накала лампы $P=UI$ определяют среднее значение яркостной температуры $T_{\text{я}}$ и термодинамическую температуру T нити (11).

1.4. По формуле (12) для каждой пары значений P и T определяют σ и находят ее среднее значение. Величины a , S и α указаны на лабораторном столе.

1.5. Строят график зависимости $\ln P$ от $\ln T$ и определяют тангенс угла наклона полученной прямой к горизонтальной оси (с учетом масштаба). Сравнивают полученное значение с показателем степени в законе Стефана – Больцмана.

1.6. Оценивают систематическую Θ_{σ} , случайную S_{σ} и полную погрешности Δ_{σ} .

2. Определение постоянной Планка

Постоянную Планка можно найти, используя формулу (10) для $\varepsilon_{\lambda T}$, если измерить спектральную плотность излучения лампы при различных температурах нити накала. Монохроматический поток можно выделить, используя светофильтр. При облучении фотоприемника (ФП) монохроматическим световым потоком в цепи приемника возникает фототок i_{Φ} , величина которого пропорциональна величине падающего потока $\Delta\Phi_{\lambda}$ и спектральной чувствительности γ_{λ} приемника:

$$i_{\Phi} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \gamma_{\lambda} d\Phi_{\lambda} = A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} k_{\lambda} \gamma_{\lambda} a_{\lambda T} \varepsilon_{\lambda T} d\lambda, \quad (13)$$

где k_{λ} – коэффициент пропускания светофильтра; A – доля излучения лампы, попадающая в фотоприемник.

Воспользовавшись теоремой о среднем и учитывая слабое изменение величин γ_{λ} , $a_{\lambda T}$, $\varepsilon_{\lambda T}$ в узком спектральном интервале, можно получить следующее выражение для i_{Φ} :

$$i_{\Phi} = \frac{B}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (14)$$

где $B = 2\pi hc^2 \Delta\lambda A \tilde{k}_{\lambda} \tilde{\gamma}_{\lambda} \tilde{a}_{\lambda T}$, $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ – спектральный интервал, выделяемый светофильтром.

Для температур, которые обычно имеет накаливаемая нить, $\frac{hc}{\lambda kT} \gg 1$. Логарифмируя (14), получим

$$\ln i_{\Phi} = \delta - \frac{hc}{\lambda kT},$$

где $\delta = \ln(B\lambda^{-5})$. Используя это соотношение для двух значений температур T_k и T_m , можно найти h

$$h = \frac{\Delta(\ln i_{\Phi})}{\frac{c}{\lambda k} \Delta\left(\frac{1}{T}\right)}. \quad (15)$$

Для выполнения второй части работы поступают следующим образом:

2.1. Измеряют, темновой ток $i_{\text{тем}}$ ФП. Дело в том, что даже при отключенной лампе накаливания в ФП может существовать некоторый ток, который обуславливается его внутренними свойствами и наличием рассеянного света.

2.2. Для тех же значений мощности накала лампы, а, следовательно, и температур (первая часть работы) измеряют значения фототока $i_{\text{изм}}$ с использованием светофильтра перед ФП и без него. Определяют значения фототока $i_{\text{ф}} = i_{\text{изм}} - i_{\text{тем}}$ для всех значений температуры нити. Результаты измерений заносят в табл. 2.

Таблица 2

T	$1/T$	$i_{\text{тем}}$	$i_{\text{изм}}$	$i_{\text{ф}}$	$\ln i_{\text{ф}}$	$i_{\text{БФ}}$

2.3. Строят график зависимости $\ln i_{\text{ф}}$ от $1/T$.

2.4. Из тангенса угла наклона графика (с учетом масштаба) определяют по формуле (15) значение h . λ – длина волны, соответствующая максимуму пропускания светофильтра. Сравнивают полученное значение с табличным значением постоянной Планка.

3. Определение удельной мощности лампы накаливания.

Под удельной мощностью источника излучения понимают мощность электрического тока P , которая затрачивается на каждую единицу силы света источника I

$$\eta = \frac{P}{I}. \quad (16)$$

Для точечных источников (каковым является нить лампы, наблюдаемая со сравнительно большого расстояния l) сила света I определяется световым потоком Φ , излучаемым источником в единичном телесном угле

$$I = \Phi / \Omega, \quad (17)$$

где $\Omega = \frac{S_{\text{пр}}}{l^2}$ – телесный угол, в котором регистрируется излучение.

Измерения фототока при освещении ФП белым светом (без фильтра) позволяют рассчитать силу света лампы при различных мощностях накала. Учитывая выражения (13) и (17) получим

$$i_{\text{БФ}} = \gamma \Phi = \gamma I \frac{S_{\text{пр}}}{l^2}, \quad (18)$$

где γ – интегральная чувствительность ФП; $S_{\text{пр}}$ – площадь освещаемой поверхности ФП; l – расстояние от ФП до нити лампы.

Используя результаты измерений $i_{\text{БФ}}$, полученные без применения светофильтра, можно рассчитать по формулам (17) и (16) силу света и удельную мощность лампы накаливания при различных температурах и мощностях накала. Значения величин γ и $S_{\text{пр}}$ указаны на лабораторном столе. Результаты расчетов представляют в виде табл. 3.

Таблица 3

P	T	$i_{\text{БФ}}$	I	

Строят и анализируют график зависимости удельной мощности лампы накаливания от силы света.

Контрольные вопросы

1. От чего зависят энергетическая светимость и поглощательная способность нагретого тела?
2. В чём состоит основное различие между чёрным и серым телами?
3. Напишите закон Кирхгофа в интегральном виде и объясните его физический смысл.
4. Объясните механизм теплового излучения.
5. От чего зависит коэффициент излучения? Какие значения принимает коэффициент для чёрного тела; серого тела; для тела с зеркальной поверхностью?
6. Напишите формулу Планка. Сформулируйте гипотезу Планка.
7. Почему модель теплового излучения, построенная на основе классической физики, оказалась несостоятельной?
8. Объясните характер экспериментальной зависимости $A_T = f(T)$.