

Лабораторная работа 3-17

ЗАКОН СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

А.А. Докучаева, В.А. Докучаева

Цель работы

Исследовать зависимость интегральной испускающей способности нити накала лампы от температуры. Рассмотреть законы излучения абсолютно черного и серого тела.

Теоретическое введение

В данной работе рассматривается тепловое излучение тел, т.е. излучение нагретых тел. Особенность этого излучения состоит в том, что оно равновесное, т.е. в состоянии термодинамического равновесия тело получает в единицу времени столько энергии, сколько излучает. Если же тело получает больше, чем излучает, то его температура повышается (и наоборот).

Закономерности теплового излучения объясняет квантовая теория. Физические тела поглощают и излучают по-разному. Различают: а) **абсолютно черное тело (АЧТ)**, которое поглощает излучение всех длин волн, т.е. его коэффициент поглощения $A = 1$; б) **абсолютно белое тело (АБТ)**, которое отражает все падающее на него излучение, т.е. $A = 0$; в) **нечерное тело**, $0 < A < 1$; г) **серое тело**, если $0 < A < 1$ и не зависит от длины волны λ .

Энергия, излучаемая нагретым телом в единицу времени с единицы поверхности в единичном спектральном интервале, называется испускающей способностью. При экспериментальном измерении испускающей способности ε АЧТ от длины волны λ получили зависимость, показанную на рис.17.1.

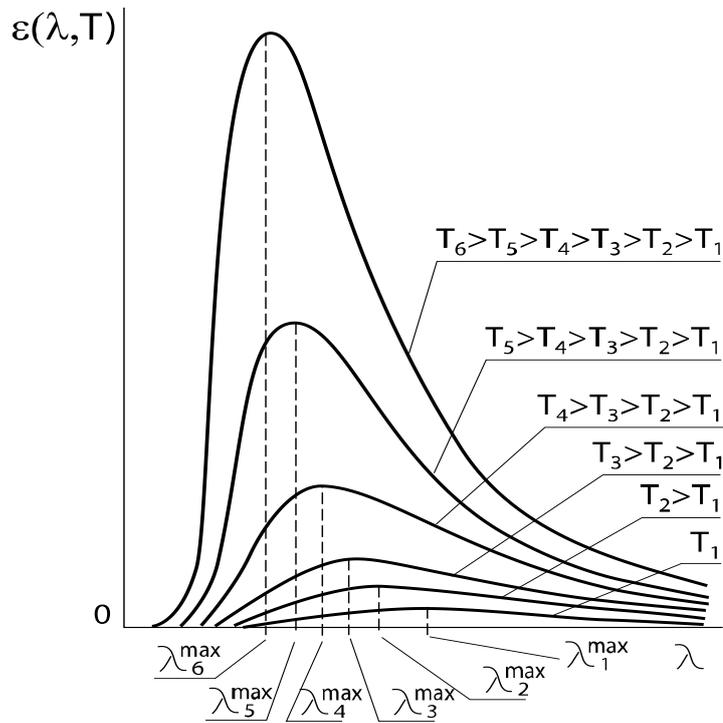


Рис.17.1. Зависимость испускательной способности $\varepsilon(\lambda, T)$ АЧТ от длины волны и температуры;

λ_i^{\max} - длина волны, соответствующая максимальному значению ε .

Спектральное распределение $\varepsilon(\lambda, T)$ при различных температурах АЧТ точно описывает формула Планка:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}, \quad (17.1)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ 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,.

Интегрируя формулу Планка по всему спектральному интервалу, получаем закон Стефана-Больцмана, т.е.

$$R_T = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4, \quad (17.2)$$

где R_T – интегральная испускательная способность АЧТ (энергетическая светимость), представляется площадью под кривой; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана.

Наконец, если решить задачу на нахождение экстремума функции Планка $\varepsilon(\lambda, T)$, т.е.

$\frac{\partial \varepsilon(\lambda, T)}{\partial \lambda} = 0$, то получим закон Вина, который записывается, как:

$$\lambda^{max} T = 2898 \text{ мкм} \cdot \text{К} \quad (17.3)$$

– произведение длины волны λ^{max} , которой соответствует максимум функции $\varepsilon(\lambda, T)$, на температуру T равно постоянной величине.

Для любых нечерных тел был установлен закон Кирхгофа:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{E_{\lambda, T}}{A_{\lambda, T}} \quad (17.4)$$

– отношение испускательной способности нечерных тел, обозначаемой $E(\lambda, T)$ к его поглотительной способности $A(\lambda, T)$ не зависит от природы тела и равно испускательной способности АЧТ, т.е. функции Планка $\varepsilon(\lambda, T)$.

В данной лабораторной работе изучается интенсивность излучения вольфрамовой нити накала лампы (серой тело) в зависимости от ее температуры. Излучение от нити попадает на термоэлемент; при фиксированном расстоянии между лампой и термоэлементом термо-ЭДС, обозначаемая $U_{ТЭ}$, будет пропорциональна интегральной испускательной способности лампы, а значит, пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры нити (закон Стефана-Больцмана), т.е.

$$U_{ТЭ} = AT^4 \quad (17.5)$$

где A – некоторая величина, не зависящая от температуры. Далее учтем, что нить лампы не является абсолютно черным телом (АЧТ), поэтому надо применить закон Кирхгофа (17.4) и надо разделить $U_{ТЭ} = E_T$ на коэффициент поглощения. $A = 0,43$.

Кроме этого $U_{TЭ}$ зависит от расстояния его до лампы. На постоянную площадь термоэлемента падают не параллельные лучи, а сферическая волна, радиус которой возрастает с расстоянием между лампой и термоэлементом (с постоянной принимающей площадью). Логарифмирую формулу (17.5), получим для абсолютно черного тела:

$$\lg U_{TЭ} = 4\lg T + \lg A \quad (17.6)$$

Построив график зависимости $\lg U_{TЭ}$ от $\lg T$ и проведя затем линейную аппроксимацию, получим по тангенсу угла наклона прямой показатель степени, равный 4.

Температуру нити накала T можно определить по сопротивлению R нити накала лампы, которая зависит от температуры по известной формуле:

$$R(t) = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2) \quad (17.7)$$

где R_0 – сопротивление при температуре 0°C ; $\alpha = 4,82 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $\beta = 6,76 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$; t – температура по шкале Цельсия; T – температура по шкале Кельвина.

Т.к. в данной работе не предусмотрено охлаждать нить до 0°C , то сопротивление R_0 рассчитывают по сопротивлению $R_{\text{ком}}$ при комнатной температуре $t_{\text{ком}}$. Из закона Ома найдем $R_{\text{ком}}$:

$$R_{\text{ком}} = \frac{U_{1эФ}}{I_1} \quad (17.8)$$

и подставим в формулу:

$$R_0 = \frac{R_{\text{ком}}}{1 + \alpha t_{\text{ком}} + \beta t_{\text{ком}}^2} \quad (17.9)$$

где $U_{1эФ}$ – эффективное напряжение на лампе при минимальном токе; I_1 – минимальный ток через лампу.

Определив сопротивление вольфрамовой нити накала R_0 , переходим к измерению сначала R , а затем к расчету T при разных токах через лампу I_1 в соответствии с индивидуальным

заданием. Сопротивление R определяем по закону Ома, а температуру нити накала лампы считаем по формуле:

$$T = 273 + \frac{1}{2\beta} \left[\sqrt{\alpha^2 + 4\beta \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right)} - \alpha \right] \quad (17.10)$$

Описание экспериментальной установки

Общий вид установки показан на рис.17.2.

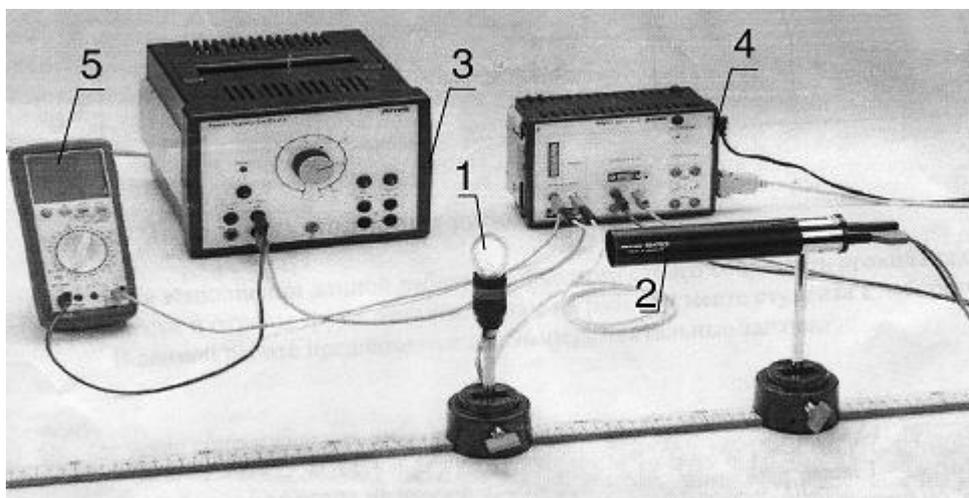


Рис. 17.2. Экспериментальная установка для изучения закона Стефана-Больцмана.

На переднем плане показана лампа 1 и термоэлемент 2, расстояние между которыми должно составлять 20 см. Далее находятся источник питания 3 и универсальный измерительный блок **Cobra-3** – обозначен как 4. Источник питания лампы соединен с цифровым мультиметром 5 и универсальным блоком **Cobra-3**. Универсальный блок **Cobra-3** соединяется с компьютером через **USB**-порт. Напряжение U_1 на лампе снимается с выхода «**Analog Jn 1/S1**» универсальной установки, а ток I_1 , текущий через лампу, измеряется с помощью цифрового мультиметра. Источник питания используется как источник переменного напряжения (AC). С помощью кнопки

“Mode” мультиметра установите AC – измерения. Значение термо-ЭДС термоэлемента U_2 снимается с выхода «Analog In 2/S2» универсальной установки.

Т.к. блок **Cobra-3** соединена с компьютером, то для измерений необходимо запустить программу “Measure”, далее выбрать “Gauge”, затем “Universal Writer”, далее в закладке “Fast measurement” установить параметры, как на рис. 17.3.



Рис.17.3. Окно параметров “Universal Writer”.

К информации об экспериментальной установке относится также табл. 17.1, в которую надо занести технические данные приборов.

Таблица 17.1

Технические данные приборов

Название прибора	Пределы измерений	Число делений	Цена деления	Класс точности	Абсолютная приборная погрешность

--	--	--	--	--	--

Порядок выполнения работы

При выполнении данной работы необходимо строго соблюдать правила техники безопасности и охраны труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории.

1. Подайте напряжение на установку $U_{1\text{эф}}(t_{\text{ком}})$. Ток через лампу должен быть минимальным. При таком слабом токе нагреванием нити можно пренебречь. Следовательно, можно по закону Ома определить сопротивление нити накала при комнатной температуре $R(t_{\text{ком}})$, используя формулу (17.8). Начните измерение, нажав кнопку **“Continue”** в окне **“Fast measurement”**. Используя функцию **“Survey”** в окне измерений величины U_1 , определите интервал напряжения ΔU_1 между максимальным и минимальным его значениями. Функция **“Analysis”** и далее **“Smooth”** может быть использована для улучшения наблюдаемой картины.

2. Далее нажав **“Start”**, получим график зависимости напряжения на лампе U_1 от времени t . По графику найдите размах ΔU_1 (расстояние между $U_{1\text{max}}$ и $U_{1\text{min}} \rightarrow \Delta U_1$), нажав на решетку в строке инструментов. Разделив ΔU_1 на 2 и еще на $\sqrt{2}$, находим $\Delta U_{1\text{эф}}$ – эффективное значение напряжения на лампе. По закону Ома найдем сопротивление нити накала лампы при комнатной температуре (табл. 17.2):

$$R_{\text{комн}} = \frac{\Delta U_{1\text{эф}}}{I_1}$$

3. По формуле (17.9) рассчитайте сопротивление нити накала лампы R_0 при 0°C .

Таблица 17.2

Расчет сопротивления $R_{\text{комн}}$ при комнатной температуре

I, mA	$t_{\text{ком}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta U_1, \text{B}$	$\Delta U_{1\text{эф}}, \text{B}$	$R_{\text{комн}} = \frac{\Delta U_{1\text{эф}}}{I_1}$
----------------	----------------------------------	------------------------	-----------------------------------	---

где $\Delta U_{1эф} = \frac{\Delta U_1}{2\sqrt{2}}$; $R = \frac{\Delta U_{1эф}}{I_1}$; $\Delta \bar{U}_2 = U_2 - U_2^0$.

Обработка результатов эксперимента

1. По данным табл. 17.2 рассчитать по формуле (17.9) сопротивление вольфрамовой нити накала лампы при нуле градусов Цельсия.

2. По данным табл. 17.3 построить график зависимости $\lg \Delta \bar{U}_2$ от $\lg T$. Определите по наклону прямой показатель степени в законе Стефана-Больцмана.

Библиографический список

а) основной

1. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Астрель. АСТ. 5-я книга. 2007. 368 с.
2. Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г. Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. Учебное пособие. – М.: МИСиС, 2007. 108 с.

б) дополнительный

5. Ландсберг Г.С. Оптика: учеб. пособие для студ. физических спец. вузов. – 99е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2003, 848 с.

Контрольные вопросы

1. В чем разница в определении света по волновой теории, по квантовой теории и по геометрической оптике?
2. Что такое абсолютно черное тело?
3. Какой формулой описывается спектральное распределение «абсолютно черного тела» от длины волны и температуры?
4. Для каких тел справедлив закон Кирхгофа?
5. Что такое закон Стефана-Больцмана?
6. Как рассчитывается сопротивление нити лампы при температуре $t=0^\circ\text{C}$?
7. По какой формуле рассчитывается температура нити лампы накаливания?
8. В чем суть работы «Закон Стефана-Больцмана»?

