

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Кафедра физики

ОТЧЁТ

по лабораторной работе №11

«Исследование закономерностей теплового излучения нагретого тела»

Выполнил: Николаев В.Ю.

Группа №: 4395

Преподаватель: Малышев М.Н.

Санкт-Петербург
2025

1 Цель работы

Целью работы является экспериментальное исследование зависимости мощности теплового излучения от температуры, а также проверка закона Стефана–Больцмана.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В фокусе объектива O зрительной трубы пирометра расположена нить L , изогнутая в форме полуокружности. Через окуляр $O_{\text{ки}}$ с красным светофильтром Φ наблюдатель видит среднюю часть нити на фоне поверхности тела, температуру которого требуется определить.

С помощью потенциометра R осуществляется регулировка тока в нити и яркости её свечения. После включения нагрева кнопкой K , ток, проходящий через нить пирометра, регулируется до тех пор, пока она не становится невидимой на фоне пластины.

Оптический пирометр прокалиброван по абсолютно чёрному телу. Шкала амперметра, измеряющего силу тока в нити, проградуирована в градусах Цельсия и определяет температуру нити, как если бы она являлась абсолютно чёрным телом.

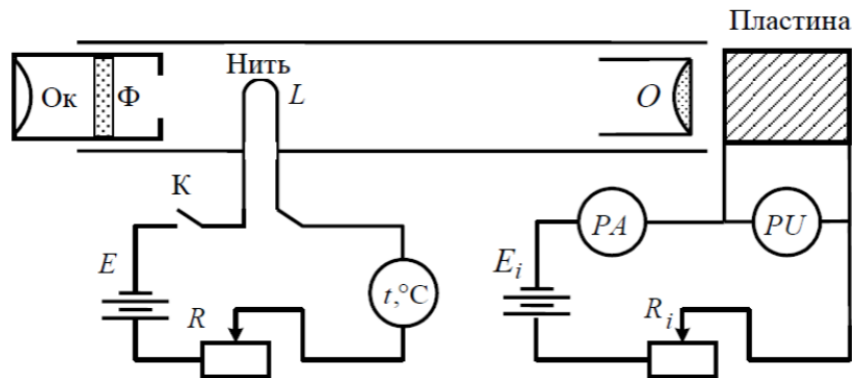


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Электрическая схема нагрева пластины включает источник тока, амперметр P_A для измерения силы тока I в пластине, которая регулируется потенциометром R_i , и вольтметр P_U для измерения напряжения U , приложенного к пластине.

2 Общие сведения

Тепловое излучение (ТИ) представляет собой явление генерации электромагнитных волн нагретым телом. Основу эффекта составляют процессы преобразования тепловой энергии макроскопической системы (нагретого тела) в энергию электромагнитного поля. Все остальные виды излучения, возбуждаемые за счёт видов энергии, отличных от тепловой, называют люминесценцией.

ТИ является изотропным, то есть вероятности испускания излучения разных длин волн или частот и поляризаций в разных направлениях равновероятны (одинаковы).

ТИ имеет сплошной спектр, т.е. его спектральные энергетические (характеристики) светимости $r_{\omega,T}$ и $r_{\lambda,T}$ (см. далее), зависящие от частот ω или длин волн λ излучения, изменяются непрерывно, без скачков.

ТИ — это единственный вид излучения в природе, которое является равновесным, то есть находится в термодинамическом или тепловом равновесии с излучающим его

телом. Тепловое равновесие означает, что излучающее тело и поле излучения имеют одинаковую температуру.

В качестве меры преобразования энергии используется мощность:

$$P = \frac{dW}{dt},$$

где dW — количество энергии, которое за время dt преобразуется из одного вида в другой.

В связи с тем, что излучение электромагнитных волн происходит с поверхности тела, а мощность теплового излучения P пропорциональна площади поверхности S , в качестве характеристики используют интегральную энергетическую светимость тела:

$$R_T = \frac{1}{S} \frac{dW}{dt} \quad (\text{Вт/м}^2) \quad (11.1)$$

Правая часть равенства (11.1) задаёт суммарную плотность потока энергии электромагнитных волн всех частот, испускаемой поверхностью нагретого тела.

Для характеристики зависимости светимости нагретого тела от частоты вводятся спектральные энергетические светимости $r_{\omega,T}$ и $r_{\lambda,T}$:

$$r_{\omega,T} = \frac{dR_T}{d\omega}, \quad r_{\lambda,T} = \frac{dR_T}{d\lambda} = \frac{dR_T}{d\omega} \cdot \frac{d\omega}{d\lambda} = r_{\omega,T} \cdot \frac{2\pi c}{\lambda^2} \quad (11.2)$$

где dR_T — суммарная плотность потока энергии, переносимой волнами, частоты которых находятся в узком интервале $(\omega, \omega + \Delta\omega)$ или $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$.

Наряду с излучением может происходить и обратное преобразование энергии: энергия электромагнитного излучения поглощается веществом, т.е. трансформируется в тепловую энергию макроскопической системы. Мерой обратного преобразования энергии служит спектральная поглощательная способность $\alpha_{\omega,T}$, определяемая как:

$$\alpha(\omega, T) = \frac{d\Phi_{\text{погл}}(\omega, T)}{d\Phi_{\text{пад}}(\omega, T)} \quad (11.3)$$

где $d\Phi_{\text{погл}}(\omega, T)$ — поток энергии, который поглощается телом, $d\Phi_{\text{пад}}(\omega, T)$ — величина падающего потока в интервале частот $(\omega, \omega + d\omega)$.

Тело, которое полностью поглощает энергию электромагнитных волн ($\alpha_{\omega,T} = 1$), называют абсолютно чёрным телом (АЧТ). Если поглощательная способность в некоторой области частот меньше единицы и не зависит от частоты, то в этой области спектра тело считается серым.

Излучение и поглощение веществом электромагнитных волн представляют собой формы проявления способности частиц вещества (атомов, молекул) к взаимодействию с электромагнитным полем. Оба эффекта существуют неразрывно ($\alpha_{\omega,T} < 1$). Это утверждение составляет основу закона Кирхгофа: для любого тела отношение спектральной энергетической светимости $r_{\omega,T}$ к его поглощательной способности $\alpha_{\omega,T}$ есть величина постоянная, равная спектральной энергетической светимости АЧТ $r_{\omega,T}^{(0)}$, для которого $\alpha_{\omega,T} = 1$:

$$\frac{r_{\omega,T}}{\alpha_{\omega,T}} = r_{\omega,T}^{(0)} \quad (11.4)$$

Винном на основе законов термодинамики была доказана следующая теорема: спектральная энергетическая светимость АЧТ пропорциональна частоте ω излучения и обратно пропорциональна его температуре T , совпадающей с температурой

излучающего тела:

$$r_{\omega,T}^{(0)} = f\left(\frac{\omega}{T}\right)$$

До построения Планком теории теплового излучения были также экспериментально открыты следующие законы теплового излучения:

$$R_T^{(0)} = \int_0^\infty r_{\omega,T}^{(0)} d\omega = \sigma T^4, \quad \lambda_m = \frac{b}{T}, \quad r_{\lambda_m,T}^{(0)} = cT^5 \quad (11.5)$$

Выражение для интегральной энергетической светимости АЧТ — это закон Стефана–Больцмана. Постоянная Стефана–Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²К⁴. Выражение для длины волны λ_m , соответствующей максимуму спектральной энергетической светимости АЧТ, называется первым законом Вина (законом смещения Вина), а выражение для $r_{\lambda_m,T}^{(0)}$ — вторым законом Вина. Постоянные:

$$b = 2,91 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}, \quad c = 1,31 \cdot 10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$$

В рамках своей теории теплового излучения Планк получил следующее выражение для спектральной энергетической светимости АЧТ, которое при использовании теоремы Вина принимает вид:

$$r_{\omega,T}^{(0)} = \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^3 c^2} \cdot \frac{1}{\exp(\hbar \omega / kT) - 1}, \quad r_{\lambda,T}^{(0)} = \frac{2\pi \hbar c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(\hbar c / \lambda kT) - 1} \quad (11.6)$$

В функции Планка используются:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \quad h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}, \quad k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$$

$$a = \frac{8\pi^5 k^4}{15c^2 \hbar^3} = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Вт/м}^2 \text{К}^4, \quad a_2 = \frac{\hbar c}{k} = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$$

3 Исследуемые закономерности

В состав экспериментальной установки входит нагретая до высокой ($T \sim 1000$ К) температуры тонкая металлическая пластина с площадью поверхности $S = 0,25$ см². Пластина относится к числу серых тел, поглощательная способность которой равна $\alpha_T = 0,92$. В процессе эксперимента измеряются мощность Джоуля–Ленца $P = UI$, выделяемая в пластине, и переходящая в мощность теплового излучения пластины $P_{\text{ти}}$. В условиях теплового равновесия:

$$P_{\text{ти}} = \alpha \sigma T^4 = P = UI$$

Для измерения температуры T пластины используется неконтактный термометр (оптический пирометр).

Через окуляр зрительной трубы пирометра наблюдатель видит (рис. 2, а) светящуюся нить (основная часть пирометра) на фоне светящейся поверхности исследуемого тела. Увеличение силы тока в нити пирометра приводит к возрастанию её температуры и яркости свечения. При определённой яркости нить становится невидимой (рис. 2, б) на фоне светящейся поверхности.



Рис. 2: Видимое изображение нагретой нити 2 на фоне светящейся поверхности исследуемого тела при разной (а) и одинаковой (б) светимости тел

Если бы оба тела (нить и пластина) являлись бы абсолютно чёрными телами, то одинаковая яркость их свечения свидетельствовала бы о равенстве их температур. В экспериментальной же установке нить пирометра является эквивалентом абсолютно чёрного тела (АЧТ), а нагреваемая пластина относится к классу серых тел. Поэтому при одинаковой яркости чёрного и серого тел их температуры T_n и T будут различны.

Оптический пирометр проградуирован по температуре АЧТ, и в опыте мы измеряем температуру T_n нити. Чтобы найти связь этой температуры с температурой T пластины, надо написать условие одинаковости яркостей чёрного и серого тел, которое в узком частотном интервале или в узком интервале длин волн имеет вид:

$$r_{\lambda, T_n}^{(0)} = \alpha \cdot r_{\lambda, T}^{(0)}$$

что эквивалентно:

$$\frac{1}{\exp\left(\frac{a}{\lambda T_n}\right) - 1} = \alpha \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{a}{\lambda T}\right) - 1} \Rightarrow \exp\left(\frac{a}{\lambda T_n}\right) = \alpha \cdot \exp\left(\frac{a}{\lambda T}\right) \Rightarrow \frac{a}{\lambda T_n} = \frac{a}{\lambda T} + \ln \alpha$$

откуда:

$$\frac{1}{T_n} = \frac{1}{T} + \frac{\lambda \ln \alpha}{a} \Rightarrow T = \frac{T_n}{1 + \frac{\lambda \ln \alpha}{a} T_n} \quad (11.7)$$

Температура тела, определяемая по (11.7), называется яркостной температурой. В эту формулу входит длина волны излучения, пропускаемого светофильтром пирометра: $\lambda = 600$ нм для жёлтого фильтра и $\lambda = 665$ нм для красного.

Согласно теоретическому прогнозу, мощность излучения даётся соотношением:

$$P = AT^n, \quad A = \alpha \sigma S, \quad n = 4$$

Проверить правильность этого закона можно разными способами. Создав выборку параметра $a = \frac{P}{T^4}$, можно по найденному выборочному значению $a \pm \Delta a$ определить постоянную Стефана–Больцмана:

$$\sigma = \frac{a}{\alpha S}, \quad \Delta \sigma = \frac{\Delta a}{\alpha S}$$

Обозначив в теоретической зависимости:

$$y = P, \quad x = T^4, \quad y = ax, \quad a = \alpha\sigma S$$

и применив метод наименьших квадратов (МНК), можно найти $a \pm \Delta a$, и по нему вычислить:

$$\sigma = \frac{a}{\alpha S}, \quad \Delta\sigma = \frac{\Delta a}{\alpha S}$$

Прологарифмируем теоретическую зависимость:

$$\ln P = \ln A + n \ln T$$

Создав выборку:

$$y = \ln P, \quad x = \ln T, \quad y = ax + b, \quad a = n \approx 4, \quad b = \ln(\alpha\sigma S)$$

Определив коэффициенты a, b методом МНК, можно вычислить:

$$\sigma = \frac{\exp(b)}{\alpha S}, \quad \Delta\sigma = \frac{\Delta b \cdot \sigma}{b}$$

Теоретическое значение коэффициента:

$$b = \ln(\alpha\sigma S) \approx \ln(0,92 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,25 \cdot 10^{-4}) \approx -3,51, \quad \lambda = 600 \text{ нм}$$

Алгоритмы обработки данных по МНК приведены в приложении к пособию. В данной работе для нахождения постоянной Стефана–Больцмана выбран первый подход.

Лабораторной работе №11

«Исследование закономерностей теплового излучения нагретого тела»

Николаев Всеволод Юрьевич 4395

Таблица 1: Зависимость мощности излучения P от температуры тела T

$a_2 = 1,441 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$, $\alpha_T = 0,92$

№	Разм.	1	2	3					θ_i
I	А								$\theta_I =$
U	В								$\theta_U =$
$P = IU$	Вт								
$\theta_P = U\theta_I + I\theta_U$									
Цвет светофильтра	Жёлтый, $t_H < 1400^\circ\text{C}$					Красный, $1400^\circ\text{C} < t_H < 2000^\circ\text{C}$			
λ	нм	600				665			
t_H	$^\circ\text{C}$								$\theta_{t_H} =$
$T_H = t_H + 273$	К								$\theta_{T_H} =$
$T = \frac{T_H}{1 + \frac{\lambda T_H \ln \alpha_T}{a_2}}$	К								
$\theta_T = \left(\frac{T}{T_H}\right)^4 \theta_{T_H}$	К								
$a = \frac{P}{T^4}$									
$\theta_a = a \left(\frac{\theta_P}{P} + \frac{4\theta_T}{T}\right)$									

Порядок выполнения работы

1. Вращением рукоятки потенциометра R_i установить силу тока $I = 2 \text{ А}$ в пластине. Установить диапазон измерения температуры до 1400°С и включить соответствующий ему жёлтый светофильтр.
2. Включить накал нити с помощью кнопки K , которая во время проведения измерений должна оставаться во включённом (замкнутом) положении. Регулируя силу тока в нити пирометра, добиться исчезновения видимого изображения нити на фоне светящейся поверхности пластины.
3. Зафиксировать следующие величины:
 - температуру нити t_H (в градусах Цельсия),
 - силу тока I в цепи нагрева пластины,
 - напряжение U на пластине.

Записать полученные данные в таблицу 1.

4. Повторить цикл измерений (шаги 1–3) при других значениях силы тока I в пластине от $2,5 \text{ А}$ до $5,5 \text{ А}$ с шагом $0,5 \text{ А}$. Всего выполнить 8 измерений.
5. При превышении температуры 1400°С переключить диапазон измерения пирометра на 2000°С и заменить жёлтый светофильтр на красный. Провести измерения аналогично, с шагом по току $0,5 \text{ А}$, записывая значения t_H , I , U , а также используемый светофильтр.
6. Для повышения точности измерений провести каждое измерение температуры нити дважды:
 - (а) при увеличении тока в нити (нагрев),
 - (б) при уменьшении тока (охлаждение).

Результаты внести в таблицу 1.