

Ярославский государственный педагогический
университет им. К. Д. Ушинского

Лабораторная работа № 1

**Изучение законов
теплового излучения
с помощью оптического
пирометра**

Ярославль
2002

Оглавление

1. Краткая теория	3
2. Описание установки	6
3. Порядок выполнения работы	8
4. Контрольные вопросы	9

Лабораторная работа № 1

Изучение законов теплового излучения с помощью оптического пирометра

Цель работы: экспериментально проверить закон Стефана-Больцмана, определить значение постоянной Стефана-Больцмана и постоянной Планка.

Приборы: оптический пирометр "Проминь", лампа накаливания, выпрямитель В-24, вольтметр, амперметр.

Литература:

1. Савельев И.В. Курс физики. М., 1989, т.3, гл 1-6.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. М., Наука, 1976, гл. 35, 36.

1. Краткая теория

Любое нагретое тело излучает энергию в виде электромагнитных волн. Электромагнитное излучение тел, обусловленное их нагреванием, называется тепловым излучением.

Тепловое или температурное излучение отличается от других видов излучения (люминесценции) только способом перехода излучающих систем в возбужденное состояние. В явлениях теплового излучения такой переход осуществляется в результате теплового движения атомов и молекул.

В отличие от других видов излучения тепловое излучение является равновесным. Это означает, что оно всегда стремится к состоянию термодинамического равновесия, при котором в любой промежуток времени количество излученной лучистой энергии в среднем равно количеству поглощенной энергии.

Тепловое излучение может быть охарактеризовано излучательной и поглощательной способностью. Энергия, излучаемая единицей поверхности нагретого тела за единицу времени, в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, называется **спектральной излучательной (испускательной) способностью тела**.

$$E_{\lambda T} = \frac{dW_{\text{изл}}}{d\lambda} \quad (1.1)$$

Полная мощность теплового излучения с единицы поверхности равна энергии излучаемой в интервале длин волн от 0 до ∞ . Эта величина R_T называется **интегральной излучательной способностью или энергетической светимостью тела**.

$$R_T = \int_0^{\infty} E_{\lambda_T} d\lambda \quad (1.2)$$

Если на некоторое тело падает поток излучения, то часть этого потока отражается, а часть поглощается. **Поглощательная способность тела** A_{λ_T} – это безразмерная величина, показывающая какую часть излучения в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ падающих на единицу поверхности тела, в единицу времени тело поглощает.

Тело полностью поглощающее всю падающую на его поверхность энергию независимо от частоты излучения называется **абсолютно черным телом**. Для абсолютно черного тела $A_{\lambda_T} = 1$. Ни одно из реальных тел не является абсолютно черным. Тела, покрытые сажей или платиновой чернью имеют близкую к единице поглощательную способность лишь в ограниченном интервале длин волн. Тело, у которого $A_{\lambda_T} < 1$ иногда называют **серым**.

Связь между излучательной и поглощательной способностью тел, независимо от их природы, выражается законом Кирхгофа.

$$\frac{E_{\lambda_T}}{A_{\lambda_T}} = r_{\lambda_T} \quad (1.3)$$

Отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от природы тела и равна излучательной способности абсолютно черного тела r_{λ_T} .

Аналитический вид функции излучательной способности черного тела удалось найти в 1900 г. М. Планку на основе его гипотезы о том, что нагретое тело излучает и поглощает энергию дискретными порциями $E = h\nu$ (квантами).

Формула Планка для r_{λ_T} имеет вид:

$$r_{\lambda_T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (1.4)$$

Учтя связь между частотой и длиной волны $\nu = \frac{c}{\lambda}$ получаем:

$$r_{\lambda T} = \frac{c}{\lambda^2} \cdot r_{\nu T} = r_{\nu T} \cdot \left| \frac{d\nu}{d\lambda} \right|, \quad (1.5)$$

- λ — длина волны излучения,
 ν — частота излучения,
 c — скорость света в вакууме.

Тогда формулу Планка можно записать в виде:

$$r_{\lambda T} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}, \quad (1.6)$$

- $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ 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.

Зная $r_{\lambda T}$ можно определить интегральную испускательную способность абсолютно черного тела.

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \cdot T^4; \quad (1.7)$$

$$R_T = \sigma T^4; \quad (1.8)$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}, \quad (1.9)$$

где σ — постоянная Стефана-Больцмана.

Формула (1.8) есть закон Стефана-Больцмана для абсолютно черного тела. Для серого тела выражение для интегральной испускательной способности, исходя из (1.4) будет иметь вид:

$$R_T = A_T \sigma T^4, \quad (1.10)$$

где $A_T = A_{\lambda T}$ при $\lambda = const$.

Если же тело, имеющее температуру T и площадь поверхности S находится в среде с температурой T_o , то мощность, которую излучает это тело определяется выражением:

$$P = R_T S;$$

$$P = A_T \sigma S (T^4 - T_o^4). \quad (1.11)$$

2. Описание установки

Для измерения температуры раскаленной нити используется оптический прибор, получивший название пирометра с исчезающей нитью. В этом приборе производится визуальное сравнение яркости исследуемого тела (в нашем случае вольфрамовой нити) с яркостью накаленной нити специальной пирометрической лампы в одном и том же спектральном интервале (обе они рассматриваются через красный светофильтр).

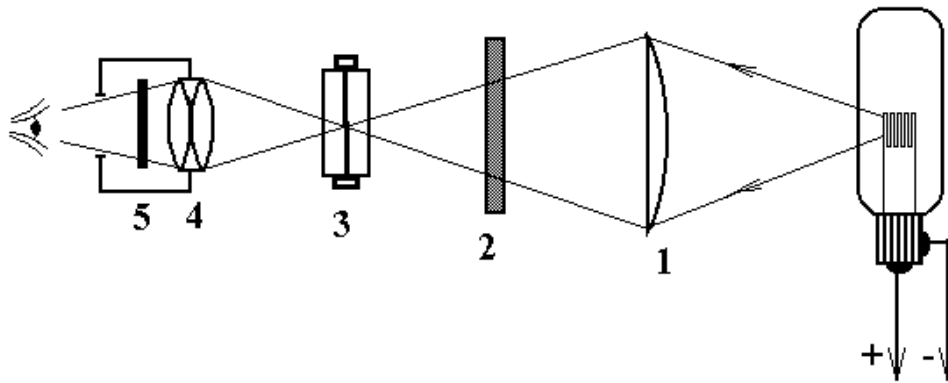


Рис. 2.1.

- 1 — объектив однолинзовый
- 2 — поглощающее стекло
- 3 — пирометрическая лампа
- 4 — аплантическая лупа
- 5 — красный фильтр

Оптическая схема пирометра показана на рис. 2.1. Объектив 1 наводится на источник излучения и расположенная в нем линза строит изображение нити исследуемого тела в плоскости эталонной пирометрической лампы 3. Оба эти изображения рассматриваются с помощью аплантической лупы 4, расположенной в окуляре. Эталонная лампа питается от сети через блок питания.

Регулируя реохордом величину тока в пирометрической лампе можно добиться исчезновения нити эталонной пирометрической лампы на фоне исследуемой вольфрамовой нити. Это будет иметь место, когда яркости

2. Описание установки

нити пирометрической и исследуемой лампы будут одинаковыми в выбранном спектральном интервале. Это означает также и равенство их испускательных способностей в этом интервале длин волн. Пирометр предварительно градуируют по излучению абсолютно черного тела, поэтому на шкале пирометра наносится температура абсолютно черного тела $T_{\text{ч}}$, которое имеет яркость одинаковую с яркостью исследуемого тела. Такая температура тела называется **якостной** $T_{\text{я}}$. Яркостная температура всегда ниже истинной термодинамической температуры тела T .

Учитывая условия градуировки пирометра можно записать, что

$$\sigma T_{\text{ч}}^4 = A_T \sigma T^4 = \sigma T_{\text{я}}^4; \quad (2.12)$$

$$A_T \sigma S (T^4 - T_o^4) = \sigma S (T_{\text{ч}}^4 - T_o^4) \sim \sigma S T_{\text{ч}}^4 = \sigma S T_{\text{я}}^4,$$

так как $T_o^4 < T_{\text{я}}^4$.

Лампа накаливания с вольфрамовой нитью включена на выход выпрямителя В-24 по схеме изображенной на рис. 2.2. Изменяя ток в лампе можно получить различную степень накала нити лампы. Зная силу тока в цепи и напряжение на лампе, которые измеряются амперметром и вольтметром, можно рассчитать мощность, затрачиваемую на нагрев нити лампы. Приравнявая потребляемую нитью лампы мощность $P = UI$ к количеству энергии теряемой нитью лампы в единицу времени в виде излучения, получаем выражение

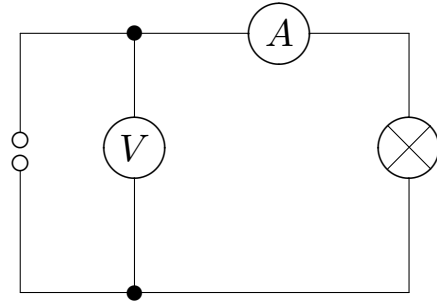


Рис. 2.2

$$UI = \sigma S T_{\text{я}}^4, \quad (2.13)$$

- U — напряжение на лампе,
- I — сила тока в цепи лампы,
- S — площадь светящейся поверхности.

График зависимости $P = f(T^4)$ представляет собой прямую проходящую через начало координат $Y = KX$, где $Y = UI$, $X = T^4$, $K = \sigma S$.

Коэффициент K можно определить по экспериментальным данным двумя способами: графическим и аналитическим. Подробное описание

каждого из этих методов можно найти в пособии **обработка результатов измерений**. Разделив K на площадь находим постоянную Стефана-Больцмана.

3. Порядок выполнения работы

1. Подготовить оптический пирометр к проведению измерений, для чего подключить пирометр к сети через блок питания. Включить пирометр поворачивая регулятор по часовой стрелке пока в окуляре не станет видна нить эталонной пирометрической лампы. Передвигая тубус окуляра добиться резкого изображения этой нити.

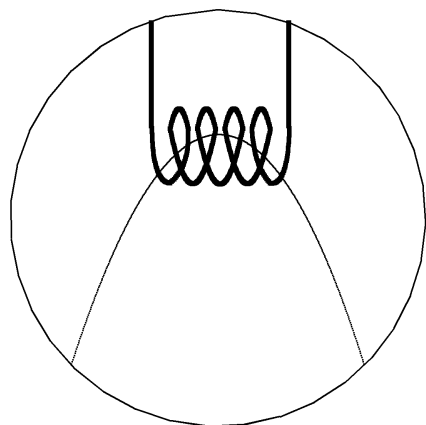


Рис. 3.1

Включить выпрямитель В-24 и установить в исследуемой лампе ток около 4 ампер. Направить объектив пирометра на светящуюся нить исследуемой лампы (так чтобы получилось наложение нитей, показанное на рис. 3.1), и передвигая тубус объектива, установить резкое изображение этой нити. С помощью поворотной обоймы ввести в поле зрения красный светофильтр.

2. Изменяя накал исследуемой лампы измерить температуру нити лампы пирометром. Ток в лампе следует менять через 0,5 А начиная от 4 А и до 6,5 А, каждый раз записывая значение напряжения.

При определении температуры пирометром меняют яркость нити пирометрической лампы до того момента, пока средний участок нити пирометрической лампы не сравняется по яркости со средним участком нити исследуемой лампы. В этот момент делают отсчет температуры по шкале пирометра. (Температура на шкале пирометра указана в градусах Цельсия). Следует обратить внимание на то, что у пирометра имеется переключатель диапазонов измерений. Отсчет температуры следует производить со шкалы, соответствующей положению переключателя пределов измерений. Измерьте температуру не менее трех раз для каждого значения тока в лампе, подходя к ней со стороны более высокой и с более низкой температуры, найдите для каждого установленного значения тока в лампе среднее значение температуры.

3. Найдите коэффициент K наклона прямой $P = KT^4$.

4. Определите полную погрешность в определении коэффициента наклона прямой. При определении погрешности принять $\Delta T = 20 \text{ K}$, $\Delta I = 0,05 \text{ A}$, $\Delta U = 0,05 \text{ B}$.

5. По известному коэффициенту K определите постоянную Стефана-Больцмана и по формуле (1.9) постоянную Планка. Площадь нити исследуемой лампы $S = 57 \text{ мм}^2$. Найдите абсолютную и относительную погрешность при определении постоянных Стефана-Больцмана и Планка в данном эксперименте.

6. Сравните полученные значения постоянных с данными из справочника.

7. Пользуясь таблицами в руководстве по эксплуатации пирометра определите действительную (термодинамическую) температуру нагрева нити исследуемой лампы. Поглощательная способность вольфрама $A_T = 0,35$.

4. Контрольные вопросы

1. Чем тепловое излучение отличается от других видов излучения?
2. Назовите величины характеризующие тепловое излучение, укажите связь между ними. Дайте определение каждой величины.
3. Сформулируйте законы теплового излучения.
4. Что такое идеально отражающее тело? Абсолютно черное тело?
5. Идеально отражающее и абсолютно черное тело получают одинаковое количество световой энергии. Каково различие в отдаваемых энергиях и в механизмах отдачи энергии?
6. Каким образом из графика $J_\lambda = f(\lambda)$ определить интегральную интенсивность излучения J .
7. Пользуясь формулой Планка получите законы Стефана-Больцмана, Вина, Релея-Джинса.
8. Начертите примерные графики $r_{\lambda T}$ для двух различных температур. Укажите, чем они отличаются и объясните физический смысл этих различий.
9. Выведите рабочие формулы для измерения постоянных Стефана-Больцмана и Планка в данной работе.

-
10. Объясните принцип работы оптического пирометра. Какую температуру тела называют яркостной? Чем обусловлены пределы измерения оптического пирометра?
 11. Какая постоянная: Планка или Стефана-Больцмана определяется в данном эксперименте с большей точностью? Почему?
 12. * Как определяется погрешность при косвенных измерениях?
 13. * Как определяются параметры наилучшей прямой аналитическим методом (методом наименьших квадратов)?