

K-4

Министерство образования Республики Беларусь
Брестский политехнический институт
Кафедра физики

**Лабораторные работы по оптике
и квантовой физике**



ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Лабораторная работа K4

Брест - 1999

Брест, БПИ, 1999

В методических указаниях приведено описание лабораторной работы К4 "ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ", в которой экспериментально проверяются зависимости между физическими величинами, характеризующими излучение нагретых тел.

Лабораторная работа предназначена для студентов всех инженерных специальностей и всех форм обучения в БПИ.

Авторы благодарны заведующему кафедрой физики А.А.Гладышуку и доценту В.И.Гладковскому за ценные замечания, способствовавшие улучшению методических указаний.



Авторы: К.И. Русаков, доцент, к.ф.-м.н.
Н.И. Чопчиц, р
А.Н. Прокс
И.Н. П*

Р

"ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ"

Цель работы: экспериментальная проверка выполнимости законов теплового излучения для реального излучающего тела.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ФОРМУЛЫ.

Любое излучающее тело характеризуется **мощностью излучения** - энергией, уносимой электромагнитными волнами от тела за единицу времени:

$$P = \frac{dE}{dt}.$$

Эту величину часто называют еще **потоком излучения** Φ_e (в системе СИ единица измерения - Ватт (Вт). 1 Вт = 1 Дж/с.).

Поток лучистой энергии всех длин волн, испускаемый с единицы поверхности тела, называется **энергетической светимостью**:

$$R_e = \frac{d\Phi_e}{dS}.$$

Энергетическая светимость измеряется в Вт/м².

Закон Стефана - Больцмана: энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры, т.е.

$$R_e^* = \sigma \cdot T^4,$$

где $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) - постоянная Стефана - Больцмана.

В теории теплового излучения рассматривается и серое тело. *Серое тело - это тело, коэффициент поглощения которого меньше 1 и не зависит от длины волны излучения и абсолютной температуры T.* Для серого тела

$$R_e = a \cdot \sigma \cdot T^4,$$

где $a < 1$ - коэффициент поглощения (поглощательность).

Для реального тела энергетическая светимость определяется так:

$$R_e = D \cdot T^n,$$

где ρ - некоторый размерный коэффициент, характеризующий тело; n - показатель степени при абсолютной температуре, отличающийся для реальных тел от 4. Отношение энергетических светимостей тела и абсолютно черного тела при одной температуре называют степенью черноты ε ($\varepsilon < 1$ - безразмерная величина):

$$\varepsilon = \frac{R_e}{R_e^*}.$$

В случае, когда рассматривается излучение не по всем длинам волн, используется понятие излучательности (спектральной плотности энергетической светимости), которая определяется соотношением:

$$r_{\lambda T} = \frac{dR_e}{d\lambda},$$

где dR_e - энергетическая светимость тела в спектральном интервале $(\lambda, \lambda + d\lambda)$.

Закон смещения Вина: длина световой волны λ_{\max} , соответствующая максимальному значению излучательности, обратно пропорциональна абсолютной температуре:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где $b = 2,8978 \cdot 10^{-3}$ м·К (постоянная Вина).

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В данной работе в качестве излучающего тела используется вольфрамовая нить накала электрической лампы. *Идея изучения законов теплового излучения с помощью электрической лампы накаливания заключается в том, что электрическая мощность лампы (количество теплоты, выделяющееся за одну секунду в проводнике при прохождении постоянного тока вследствие закона Джоуля-Ленца) и мощность излучения лампы по всем длинам волн практически равны.*

В этом случае энергетическая светимость R_e лампы накаливания (определяемая по закону Стефана - Больцмана через абсолютную температуру спирали),¹ после умножения на площадь излучающей поверхности S должна быть равна электрической мощности лампы. С другой стороны, электрическая мощность лампы равна произведению тока I через лампу и напряжения

на лампе $U_{\text{л}}$. Для нахождения электрической мощности лампы и температур нити накаливания используется схема, показанная на рис. 1.

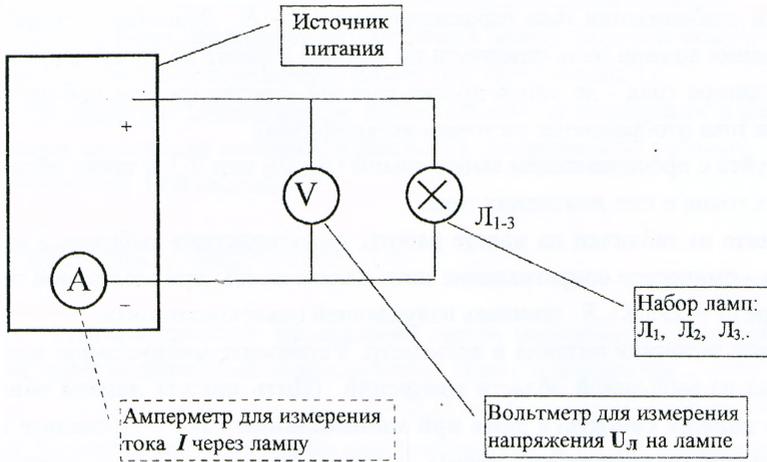


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

В данной схеме лампа накаливания и вольтметр соединены параллельно. Сопротивление вольтметра составляет $\sim 10^7$ Ом, а сопротивление “горящей” лампы - порядка 10^3 Ом, поэтому можно пренебречь током через вольтметр и считать, что напряжение на лампе $U_{\text{л}}$ равно показанию вольтметра. Универсальный источник питания используется в режиме стабилизации тока, то есть мы задаем ток в цепи, а напряжение на лампе измеряем. Умножив величину тока на напряжение $U_{\text{л}}$, получаем электрическую мощность лампы P , которую вследствие малости тепловых потерь на нагревание цоколя лампы, патрона и проводов можно считать равной мощности теплового излучения лампы по всем длинам волн. Температура спирали лампы находится по закону Ома через напряжение $U_{\text{л}}$ и сопротивление нагретой лампы $R_{\text{лн}}$ в предположении линейной зависимости между температурой спирали и ее омическим сопротивлением. Таким образом, электрические характеристики лампы оказываются связанными с энергетической светимостью, что позволяет на данной установке проверить законы теплового излучения для реального излучающего тела - вольфрамовой спирали лампы.

3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Перед началом работы установите (не включая в сеть!) источник питания в режим стабилизации тока переключателем $V - A$. Рукоятка регулятора напряжения должна быть повернута по часовой стрелке до упора, а рукоятка регулятора тока - до упора против часовой стрелки (режим работы источника тока отображается световым индикатором).
2. Согласуйте с преподавателем выбор лампы (L_1 , L_2 или L_3), а также область рабочих токов и шаг изменения тока.
3. Выпишите из таблички на макете работы характеристики выбранной лампы: $R_{лк}$ - омическое сопротивление нити накала лампы при комнатной температуре ($T = 295 \text{ K}$), S - площадь излучающей поверхности нити.
4. Включите источник питания и вольтметр. Установите минимальное значение тока из выбранной области измерений (Нить накала лампы обязательно должна светиться даже при минимальном токе!). Проведите измерения для режимов работы схемы, заданных преподавателем и запишите в табл.1 значения величин токов I и напряжений U_L .

Таблица 1.

$N_{п/п}$	I (А)	U_L (В)	P (Вт)	$\lg P = y$	$R_{лт}$ (Ом)	T (К)	$\lg T = x$
1							
...							
N							

5. Используя формулы (4.3) - (4.8), вычислить все величины, указанные в таблице 1 для каждого из токов.
6. По данным табл.1 построить график зависимости $y(x)$, т.е. $\lg P(\lg T)$.
7. С помощью метода наименьших квадратов по формулам (4.11) и (4.12) найти величины p и q .
8. Используя коэффициент q , по формулам (4.13) и (4.14) вычислить величину D и коэффициент черноты ϵ вольфрамовой нити накала лампы при ее максимальной температуре в проведенных опытах (при максимальном токе через лампу).
9. Записать выражение для энергетической светимости R_e для исследованного тела и сделать выводы о применимости закона Стефана-Больцмана для излучения реального тела.

10. Определить по закону смещения Вина, на сколько нанометров сдвигается максимум энергетической светимости лампы в проведенных опытах, то есть при минимальном и максимальном напряжениях на лампе.
11. По указанию преподавателя выполнить расчет энергетического светового кид лампы, применявшейся в работе (см. Приложение 1).
12. По указанию преподавателя найти, сколько используемых в работе лампочек нужно для создания нормальной освещенности рабочего места для чтения (см. Приложение 1).

4. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Температура нити накаливания лампы определяется косвенным методом, через ее омическое сопротивление. Известная формула

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot t) \quad (4.1)$$

где R_0 - сопротивление лампы при температуре 0°C , α - температурный коэффициент сопротивления, выполняется только в ограниченном диапазоне температур. По всему диапазону достижимых температур коэффициент α не является постоянной величиной, а зависимость $R(t)$ не является линейной.

В данной работе используемый диапазон температур не очень велик, поэтому будем считать, что в данной области нелинейная температурная зависимость хорошо аппроксимируется отрезком прямой вида (4.1).

Обозначив сопротивление спирали лампы при $T = 273 \text{ K}$ (при 0°C), как $R_{\text{Л}0}$, $R_{\text{ЛК}}$ - сопротивление спирали лампы при комнатной температуре (22°C), $R_{\text{ЛТ}}$ - сопротивление лампы в нагретом состоянии при температуре T , запишем соотношения

$$R_{\text{ЛК}} = R_{\text{Л}0}(1 + \alpha t_k), \quad (4.2)$$

$$R_{\text{ЛТ}} = R_{\text{Л}0}(1 + \alpha t_{\text{Л}}), \quad (4.3)$$

где $\alpha = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ - температурный коэффициент сопротивления вольфрама. Из уравнений (4.2) и (4.3) выразим $R_{\text{ЛТ}}$:

$$R_{\text{ЛТ}} = R_{\text{ЛК}}(1 + \alpha t_{\text{Л}})/(1 + \alpha t_k).$$

Из этой зависимости следует формула для абсолютной температуры нити накала "горящей" лампы:

$$T = 273 + (t_k + 1/\alpha) R_{\text{ЛТ}}/R_{\text{ЛК}} - 1/\alpha. \quad (4.4)$$

Сопротивление "горящей" лампы определяется из закона Ома:

$$R_{\text{ЛТ}} = U_{\text{Л}}/I. \quad (4.5)$$

После подстановки $R_{\text{Л}}$ в уравнение (4.5) получим выражение:

$$T = 273 + U_{\text{Л}}(t_{\text{к}} + 1/\alpha)/(I \cdot R_{\text{ЛК}}) - 1/\alpha. \quad (4.6)$$

Соответственно, мощность, выделяющаяся на лампе, равна:

$$P = I \cdot U_{\text{Л}}. \quad (4.7)$$

Если учесть, что энергетическая светимость равна $R_e = P/S$, т.е. мощности, излучаемой с единицы поверхности тела, а с другой стороны, для реального тела $R_e = D \cdot T^n$, то получим:

$$P = D \cdot S \cdot T^n. \quad (4.8)$$

Логарифмируя это равенство, найдем:

$$\lg P = n \cdot \lg T + \lg(D \cdot S). \quad (4.9)$$

Обозначая $\lg P = y$; $\lg T = x$; $\lg(D \cdot S) = q$, получим:

$$y = nx + q. \quad (4.10)$$

Согласно методу наименьших квадратов (МНК), можно аналитически найти постоянные n и q ; рассчитав суммы:

$$\begin{aligned} C_1 &= \sum_{i=1}^N x_i^2; & C_2 &= \sum_{i=1}^N x_i; \\ Z_1 &= \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i; & Z_2 &= \sum_{i=1}^N y_i; \end{aligned} \quad (4.11)$$

где N - количество измерений, найдем:

$$n = \frac{N \cdot Z_1 - C_2 \cdot Z_2}{N \cdot C_1 - C_2^2}, \quad q = \frac{C_1 \cdot Z_2 - C_2 \cdot Z_1}{N \cdot C_1 - C_2^2} \quad (4.12)$$

Коэффициент q численно равен длине отрезка, отсекаемого на оси y зависимостью $y(x)$ при $x = 0$ (смотри рис. 2), причем $q < 0$.

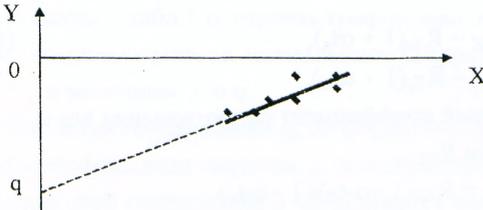


Рис. 2. Примерный вид зависимости $y(x)$, то есть логарифма электрической мощности лампы от логарифма температуры вольфрамовой нити накала лампы (зависимость $\lg P$ от $\lg T$).

Следовательно, $D \cdot S = 10^9$, откуда находим коэффициент D :

$$D = \frac{10^9}{S}. \quad (4.13)$$

В этом случае коэффициент черноты ε будет равен:

$$\varepsilon = \frac{D \cdot T^n}{\sigma \cdot T^4}, \quad (4.14)$$

где T - термодинамическая температура.

5. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

5.1. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ.

С давних времен было известно, что тела, нагретые до высокой температуры, начинают светиться. При постепенном увеличении температуры твердое тело испускает сначала красный свет, затем оранжевый и желтый. В свою очередь, тела, на которые падает излучение, нагреваются. Таким образом, всеобщей закономерностью в природе является то, что все тела обмениваются энергией излучения, которая при поглощении превращается во внутреннюю энергию. Тела, имеющие более высокую температуру, излучают с единицы поверхности больше тепловой энергии, чем тела, температура которых соответственно ниже. Поэтому говорят о тепловом или температурном излучении тел, т.е. излучении, зависящем только от количества теплоты, сообщенного телу и приводящего к повышению его температуры.

Тепловое излучение тел играет важнейшую роль в жизни человеческого общества, так как существование жизни на Земле зависит от падающих на ее поверхность потоков лучистой энергии, испускаемых Солнцем. Кроме того, тепловое излучение используется в большинстве производственных процессов, основанных на подогреве тел, а также для поддержания жизненно необходимых человеку температур в холодное время года в жилых и производственных помещениях.

Для того, чтобы излучение тела происходило неопределенно долгое время, к излучающему телу должно подводиться соответствующее количество энергии, превращаемой в тепловую. Если при этом с телом не происходит

никаких физических и химических изменений, то его излучение характеризуется только одной физической величиной - температурой тела.

Когда нарушается равенство между получаемой телом энергией и ее излучением, температура тела понижается или повышается, что приводит к его остыванию или нагреванию. При прекращении подвода энергии излучение тела может происходить за счет его внутренней энергии. При остывании тела до температуры окружающей среды теплообмен между телом и средой не прекращается, так как одновременно с излучением энергии тело получает ее от окружающей среды, также являющейся излучающим телом.

Излучение происходит при всех температурах. Каждое из излучений, испускаемых телами, характеризуется своим спектром, то есть совокупностью частот волн, содержащейся в данном излучении.

Немецким ученым Кирхгофом в теорию теплового излучения было введено представление о таком теле, излучение которого не зависит от его физических и химических свойств, от его состава, а зависит только от температуры. Такое тело должно обладать свойством полностью поглощать все излучения любой длины волны, а следовательно, быть абсолютно черным телом. Экспериментальным путем было получено распределение энергии в спектре излучения модели абсолютно черного тела в зависимости от длины волны и температуры. Однако не удалось найти аналитической зависимости потока излучения от длины волны и абсолютной температуры на основании классической физики (электромагнитная теория излучения атомов, закон распределения Максвелла, классическая термодинамика, электронная теория строения вещества).

Пытаясь устранить разногласия между теорией и опытными данными, М. Планк предположил, что энергия излучающих атомов и молекул может изменяться не на любую величину, как это имеет место для поступательно движущихся молекул газа, а только на отдельные порции (кванты). Иначе говоря, любой атом или молекула при лучеиспускании может выделять только целое число таких квантов.

Величина кванта лучистой энергии в теории Планка пропорциональна частоте света:

$$\varepsilon = h\nu = hc/\lambda. \quad (5.1)$$

Коэффициент пропорциональности h (постоянная Планка) для всех тел и для всех температур постоянен и равен

$$h = 6.625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с.}$$

Для распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела Планком была получена формула:

$$\Gamma_{\lambda, T} = \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{2\pi c^2 h}{e^{hc/\lambda k T} - 1}, \quad (5.2)$$

где h - постоянная Планка; $k = 1,38054 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана; T - абсолютная температура; c - скорость света в вакууме; λ - длина волны излучаемого света; e - основание натуральных логарифмов.

Функцию $\Gamma_{\lambda, T}$ называют спектральной плотностью энергетической светимости (излучательной способностью) тела. Она равна энергии, излучаемой с единицы поверхности тела в единицу времени в единичном интервале длин волн при данной абсолютной температуре. Спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела неодинакова в разных частях спектра и в большой степени зависит от температуры.

Все тела в природе не только излучают или поглощают энергию, но и отражают или пропускают ее, будучи до некоторой степени прозрачными. Поэтому для характеристики всех реальных тел вводятся три коэффициента: поглощения (α), отражения (ρ) и пропускания (τ). Коэффициент поглощения для данного тела определяется отношением поглощенной части потока лучистой энергии к потоку энергии, падающему на поверхность тела.

В разных частях спектра одно и то же тело поглощает неодинаково; для световых лучей с разной длиной волны коэффициент поглощения будет иметь неодинаковое значение. Он является также некоторой функцией температуры тела $\alpha = \alpha(\lambda, T)$ (обозначается $\alpha_{\lambda, T}$). Например, при пропускании через очень тонкие слои золота естественного света золото приобретает (на просвет) зеленоватую окраску. Это свидетельствует о том, что часть естественного света поглощается, а часть - проходит и создает окраску.

Спектральный коэффициент поглощения $\alpha_{\lambda, T}$ называется также поглощательной способностью тела и равен отношению поглощенной части светового потока в интервале длин волн $\lambda \div \lambda + d\lambda$ к величине светового потока с длиной волны λ .

5.2. СВЯЗЬ МЕЖДУ ИЗЛУЧЕНИЕМ И ПОГЛОЩЕНИЕМ ТЕЛА. ЗАКОН КИРХГОФА.

Излучение энергии телом во всем интервале длин волн характеризуется величиной, называемойся **энергетической светимостью** (излучательностью):

$$R_e = \frac{d\Phi_e}{dS}, \quad (5.3)$$

где $d\Phi_e$ - поток лучистой энергии всех длин волн, испускаемый с элемента поверхности тела dS , или средняя мощность излучения за время, значительно большее периода световых колебаний.

Если учесть распределение энергии в спектре излучения тела по длинам волн, то общая энергетическая светимость R_e представляет собой сумму всех спектральных плотностей энергетической светимости r_λ во всем интервале длин волн при данной температуре:

$$R_e = \int_0^{\infty} r_\lambda \cdot d\lambda \quad (5.4)$$

Кроме того, оказалось, что существует определенная связь между излучательностью тела и поглощением в нем света. Опытные факты указывают на то, что различные тела, приведенные к одинаковой температуре, излучают неодинаковое количество энергии с единицы поверхности в единицу времени. Например, поверхность угля излучает больше энергии в видимой области спектра, чем такая же по площади поверхность платины или стекла.

Для получения соотношения между излучательными способностями тел рассмотрим, что происходит внутри твердой оболочки, поддерживаемой при постоянной температуре, если внутрь нее внести тела с существенно отличными свойствами. Пусть тела и оболочка обмениваются энергией только путем излучения и поглощения света. Через некоторое время после внесения тел в оболочку вся система (оболочка и тела, находящиеся в ней) достигнет одинаковой и устойчивой температуры.

Можно сказать, что система находится в состоянии теплового равновесия. При этом не только между телами и оболочкой, но и между отдельными элементами оболочки происходит непрерывный обмен излучением. Тело, обладающее большей излучательной способностью, будет иметь постоянную

температуру T , одинаковую с температурой других тел в оболочке, только если оно будет поглощать больше энергии по сравнению с другими телами. Отсюда следует, что при тепловом равновесии тел, обменивающихся энергией только лишь путем поглощения и излучения, должна иметь место пропорциональность между излучательной $\Gamma_{i\lambda, T}$ и поглощательной $\alpha_{i\lambda, T}$ способностями тел (i – индекс, приписываемый данному телу). Если в оболочку поместить тело, для которого поглощательная способность по всему спектру равна единице и поглощенная им энергия целиком превращается в тепло (абсолютно черное тело), то для него выполняется следующее соотношение:

$$\frac{\Gamma_{1\lambda, T}}{\alpha_{1\lambda, T}} = \frac{\Gamma_{i\lambda, T}}{\alpha_{i\lambda, T}} = \dots = \frac{\Gamma_{n\lambda, T}}{\alpha_{n\lambda, T}} = f(\lambda, T) = \Gamma_{\lambda, T}^* \quad (5.5)$$

где $\Gamma_{\lambda, T}^*$ – спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела, соответствующая длине волны λ и температуре T ; $\Gamma_{i\lambda, T}$, $\alpha_{i\lambda, T}$ – соответственно спектральная плотность энергетической светимости и поглощательная способность i -го тела при температуре T . Это соотношение выражает закон Кирхгофа: *отношение спектральной плотности энергетической светимости тел к их поглощательной способности при одной и той же температуре является для всех тел одинаковой функцией длины волны и абсолютной температуры и равно спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела при той же температуре.*

На основании закона Кирхгофа спектральную плотность энергетической светимости любого тела можно выразить через спектральную плотность энергетической светимости абсолютно черного тела:

$$\Gamma_{i\lambda, T} = \alpha_{i\lambda, T} \cdot \Gamma_{\lambda, T}^* \quad (5.6)$$

Согласно закону Кирхгофа, тепловое излучение тел, несмотря на их многообразие и различные свойства, теоретически может быть выражено с помощью переменных коэффициентов через излучение абсолютно черного тела, но практически трудно подобрать такие коэффициенты, поскольку в процессе нагревания изменяются физические и химические свойства тел.

Так как для реальных тел поглощательная способность во всех частях спектра при всех температурах меньше единицы ($\alpha_{\lambda, T} < 1$), то из закона Кирхгофа следует, что спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела больше спектральной плотности энергетической светимости любого тела в природе.

Из закона Кирхгофа вытекает также еще одно важное следствие: *каждое тело лучше всего поглощает излучение с теми самыми длинами волн, которые оно испускает при данной температуре.* Следовательно, можно теоретически определять поглощательную способность тел по их спектральной плотности энергетической светимости. поскольку в случае абсолютно черного тела $\epsilon_{\lambda, T}^*$ может быть вычислена для любого интервала длин волн и температур по формуле Планка.

В природе не существует тел, совпадающих по своим свойствам с абсолютно черным телом. Даже такое вещество, как копоть (сажа), обладающая наибольшим коэффициентом поглощения, не может быть сравнено с абсолютно черным телом во всех частях спектра, потому что коэффициент поглощения сажи уменьшается от 0,99 в видимой и ультрафиолетовой области до 0,98 в инфракрасной области.

В теории теплового излучения рассматривается также серое тело. *Серое тело - тело, коэффициент поглощения которого меньше 1 и не зависит от длины волны излучения и абсолютной температуры T .* Коэффициент поглощения $\alpha_{\lambda, T}$ всех реальных тел зависит от λ и T , поэтому их можно считать серыми лишь в том интервале λ и T , где $\alpha_{\lambda, T}$ приблизительно постоянен.

подавляющее большинство тел в природе являются избирательно поглощающими, для которых поглощающая способность, оставаясь всегда меньше единицы, имеет неодинаковые значения для разных длин волн падающего на него излучения и зависит от температуры.

5.3. ЗАКОНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА

Закон Стефана-Больцмана.

Еще до возникновения квантовой теории излучения практические исследования и термодинамические рассуждения привели к открытию общих законов излучения абсолютно черного тела. Первый из них был открыт опытным путем Стефаном, а теоретическим путем - Больцманом - закон светимости Стефана - Больцмана: **энергетическая светимость (мощность излучения с единичной площади поверхности) абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры, т.е.**

$$R_e^* = \sigma \cdot T^4, \quad (5.7)$$

где $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - постоянная Стефана - Больцмана.

Энергетическая светимость R_e является энергией излучения всех длин волн с единицы поверхности за единицу времени при данной абсолютной температуре и численно равна площади под кривой зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны, т. е. $r_{\lambda,T} = f(\lambda)$. Такое графическое представление энергетической светимости является следствием формулы:

$$R_e^* = \int_0^{\infty} r_{\lambda}^* \cdot d\lambda.$$

Из закона Стефана-Больцмана следует важный вывод: *тела излучают (следовательно, и поглощают) при любых температурах.*

Закон смещения Вина.

Второй закон излучения устанавливает связь между положением максимума спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела в спектре излучения и абсолютной температурой тела. Данный закон носит имя немецкого физика Вина, получившего в 1911 г. Нобелевскую премию за открытие законов теплового излучения: **Длина световой волны λ_{max} , на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, обратно пропорциональна абсолютной температуре:**

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}, \quad (1.8)$$

где $b = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ (постоянная Вина).

Согласно этому закону, чем выше температура абсолютно черного тела, тем на более короткую волну приходится максимум его излучательной способности. Для абсолютных температур до 4500 К максимум излучательной способности тела находится в инфракрасной области спектра. При температуре примерно 5000 К максимум излучательной способности попадает в желто-зеленую область спектра ($\lambda = 0,547 \text{ мкм}$), к которой особенно чувствителен глаз человека.

5.4. ИЗЛУЧЕНИЕ РЕАЛЬНЫХ ТЕЛ.

Реальные тела являются нечерными и несерыми телами. Физические и химические свойства их неодинаково меняются как при взаимодействии с излучениями из разных частей спектра, так и при изменении температуры, причем эти изменения сказываются на их энергетической светимости и коэффициенте поглощения.

Для каждого реального тела существует определенная, только ему свойственная область избирательного (селективного) излучения и поглощения. Наличие в спектрах излучения или поглощения селективных максимумов является наиболее характерным признаком для излучения нечерных тел.

Все попытки точно выразить законы излучения нечерных тел посредством формул, аналогичных формулам для абсолютно черного тела в широком интервале температур не привели к надежным результатам, так как константы, входящие в выражение законов, меняют свое значение при изменении температуры и имеют разное значение в разных частях спектра.

Например, для тантала произведение $\lambda_{\max} \cdot T$ увеличивалось с $2,5 \cdot 10^{-3}$ до $3,3 \cdot 10^{-3}$ м·К с возрастанием T от 1000 К до 3000 К, хотя по закону Вина оно должно оставаться постоянным.

Причины, вызывающие эти изменения, разнообразны. Наиболее вероятными из них являются изменения в структуре, которым подвергаются тела при изменении температуры и которые для разных тел бывают совершенно разными. Изменения в структуре вызывают изменения других физических свойств. Вместе с тем, чем выше температура тел, тем больше их излучение приближается к излучению абсолютно черного тела, особенно для небольших интервалов температур и длин волн.

С целью получения зависимости R_e от температуры для реальных тел можно применить анализ размерностей. Поскольку по закону Кирхгофа:

$$\frac{\Gamma_{\lambda, T}}{\alpha_{\lambda, T}} = \Gamma_{\lambda, T}^*$$

и $\alpha_{\lambda, T}$ - безразмерная функция λ и T , то в выражение $\Gamma_{\lambda, T}$ для реальных тел не могут входить никакие другие величины, кроме тех, которые входят в $\Gamma_{\lambda, T}^*$, т.е. c - скорость света в вакууме, k - постоянная Больцмана, h - постоянная Планка, T - термодинамическая температура, λ - длина волны. Поскольку

т.е. c - скорость света в вакууме, k - постоянная Больцмана, h - постоянная Планка, T - термодинамическая температура, λ - длина волны. Поскольку

$$R_e^* = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T}^* \cdot d\lambda, \quad R_e = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} \cdot d\lambda,$$

то те же величины должны входить в формулу для R_e . Следует, однако заметить, что наибольшее отличие от черных тел у металлов наблюдается в области больших длин волн, для которых практически $\alpha_{\lambda,T} = 0$, так что и $r_{\lambda,T} = 0$ (металлы практически не поглощают длинные волны). Поэтому можно предположить, что с достаточной степенью точности

$$R_e = \int_0^{\lambda_0} r_{\lambda,T} \cdot d\lambda,$$

где λ_0 - некоторая характерная для данного металла длина волны, такая, что при любых больших длинах волн $\lambda > \lambda_0$ имеем $r_{\lambda,T} = 0$. Таким образом, попробуем искать зависимость R_e от температуры в виде:

$$R_e = F \cdot c^\alpha \cdot k^\beta \cdot h^\gamma \cdot T^\delta \cdot \lambda_0^\theta,$$

где F - безразмерная постоянная. Поскольку

$[c] = \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; $[k] = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$; $[h] = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $[T] = \text{К}$; $[\lambda_0] = \text{м}$; $[R_e] = \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$, то подставляя единицы измерений в формулу для R_e и приравнивая показатели степеней при единицах массы, длины, времени и температуры, получим систему уравнений

$$\begin{cases} \alpha + 2\beta + 2\gamma + \theta = 0, \\ \alpha + 2\beta + \gamma = 3, \\ \beta + \gamma = 1, \\ -\beta + \delta = 0. \end{cases}, \text{ решение которой имеет вид } \begin{cases} \alpha = -(2 + \theta), \\ \beta = 4 + \theta, \\ \gamma = -(\beta + \theta), \\ \delta = 4 + \theta. \end{cases}$$

Подставляя найденные значения α , β , γ , δ в выражение для R_e , получаем:

$$R_e = F_0 \left(\frac{k \cdot \lambda_0}{c \cdot h} \right)^\theta \frac{k^4}{c^2 h^3} \cdot T^{4+\theta},$$

где F_0 - некоторая постоянная, не зависящая от характеризующих процесс теплового излучения величин. Обозначая

$$F_0 \left(\frac{k \cdot \lambda_0}{c \cdot h} \right)^\theta \frac{k^4}{c^2 h^3} = D,$$

получим

$$R_e = D \cdot T^{4+\theta} = D \cdot T^n, \quad \text{где } n = 4 + \theta.$$

D - размерная величина, характеризующая данный металл.

6. ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

Светом в узком смысле слова называются электромагнитные волны, непосредственно воспринимаемые глазом. Принято считать, что глаз воспринимает длины волн от $\lambda_{\min} = 400$ нм до $\lambda_{\max} = 750$ нм. Поэтому любой источник электромагнитного излучения может быть охарактеризован энергетическим световым КПД, который показывает, какую долю энергии он излучает в видимой части спектра:

$$\eta_e = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} r_{\lambda T} d\lambda}{\int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} r_{\lambda T} d\lambda}{R_e},$$

где R_e - энергетическая светимость. Поскольку для серого тела поглощательная способность постоянна, то энергетический световой КПД для него будет тем же, что и для абсолютно черного тела при той же температуре:

$$\eta_e = \eta_e^* = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} r_{\lambda T}^* d\lambda}{R_e^*},$$

где $r_{\lambda T}^* = \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{2\pi c^2 h}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$ - излучательная способность АЧТ.

Интеграл, стоящий в числителе выражения для η_e^* , может быть приближенно вычислен по формуле трапеции. Для этого разобьем промежуток от λ_{\min} до λ_{\max} на 10 частей и положим $\Delta = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/10 = 35$ нм.

Обозначим $\lambda_i = \lambda_{\min} + i \cdot \Delta$ ($\lambda_0 = \lambda_{\min}$, $\lambda_{10} = \lambda_{\max}$). Вычислим значения функции $\Gamma_{\lambda T}^*$ при всех значениях $i = 0 \div 10$. Тогда

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Gamma_{\lambda T}^* d\lambda \approx \left[\frac{\Gamma_{\lambda_0 T} + \Gamma_{\lambda_{10} T}}{2} + \Gamma_{\lambda_1 T} + \dots + \Gamma_{\lambda_9 T} \right] \cdot \Delta.$$

Проведите все вычисления и найдите η_e .

В указанном спектральном интервале чувствительность глаза различна к волнам различной длины. Она наибольшая для длины волны 555 нм и уменьшается до нуля к краям интервала (λ_{\min} , λ_{\max}). Мы не будем входить в подробные объяснения фотометрических величин, определяющих физиологическое восприятие света глазом. Укажем лишь, что физиологическим аналогом мощности излучения, т.е. ежесекундно излучаемой телом энергии, является световой поток Φ , представляющий оценку по зрительному ощущению мощности излучения. Он измеряется в люменах (лм). Если световой поток разделить на площадь освещаемой поверхности, получится величина, называемая освещенностью E и измеряемая в люксах. Для ориентировки укажем, что нормальная освещенность рабочего места при чтении равна 500 лк, т.е. на площадь 1 м^2 должен падать световой поток 500 лм. Для излучения с длиной волны 555 нм мощность излучения 1 Вт эквивалентна световому потоку 680 лм. Для других длин волн переводной множитель от мощности в Ваттах к световому потоку в люменах равен $V(\lambda) \cdot 680 \text{ лм/Вт}$, где функция $V(\lambda)$ называется спектральной видностью. Фрагмент таблицы $V(\lambda)$ приведен ниже.

$\lambda(\text{нм})$	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650	675	700
$V(\lambda)$	0	0.01	0.05	0.12	0.30	0.8	1.0	0.9	0.57	0.27	0.1	0.02	0

Величина $V(\lambda) \cdot 680 \cdot \Gamma_{\lambda T} d\lambda$ представляет собой световой поток, излучаемый единицей площади тела в интервале длин волн (λ , $\lambda + d\lambda$), а весь световой поток равен, следовательно

$$\Phi = S \cdot 680 \cdot \varepsilon \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Gamma_{\lambda T}^* V(\lambda) d\lambda,$$

где S - площадь излучающей поверхности, ε - коэффициент черноты вольфрамовой спирали лампы. Интеграл может быть найден точно так же, как и предыдущий.

Проведите все вычисления и найдите, сколько используемых в работе лампочек нужно для создания нормальной освещенности рабочего места для чтения. Расстояние от лампочек до освещаемого места примите равным 1 м и считайте, что лампочки излучают равномерно во все стороны.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова природа теплового излучения?
2. Основные характеристики теплового излучения.
3. Объясните смысл формулы Планка для излучения абсолютно черного тела и изобразите примерный вид этой функции.
4. В чем заключается гипотеза Планка?
5. Поясните закон Кирхгофа для теплового излучения.
6. Как зависит поток излучения от абсолютной температуры тела?
7. Сформулируйте и поясните закон Вина.
8. Как определить мощность излучения лампы?
9. Как определить температуру нагретой нити накала лампы?
10. Как определить коэффициент черноты поверхности нити накала лампы и показатель степени температуры в законе Стефана-Больцмана?

8. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Д.В. Сивухин. Общий курс физики, Т. 4, Оптика. 1985.
2. И.В. Савельев. Курс общей физики, Т. 3. Квантовая оптика и др.
3. А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. Курс физики, 1989
4. А.А. Детлаф, Б.М. Яворский, Л.Б. Милковская Курс физики (в 3-х томах), Т. 3. Оптика и атомная физика. 1973-1979.
5. И.И. Наркевич, Э.И. Волмянский, С.И. Лобко Физика для ВТУЗов, Электричество и магнетизм. Оптика. Строение вещества., 1994.
6. Т.И. Трофимова Курс физики. 1985.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Составители: Русаков Константин Иванович
Чопчиц Николай Игнатьевич
Прокопеня Александр Николаевич
Прокопеня Ирина Николаевна

“ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ”

Методические указания по выполнению
лабораторной работы К4

Ответственный за выпуск Русаков К.И.
Редактор Строкач Т.В.

Подписано к печати 30.03.99г. . Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.
Усл. п. л. 1,3. Уч. изд. л. 1,17. Заказ № 233 . Тираж 150 экз. Бесплатно.
Отпечатано на ризографе Брестского политехнического института,
224017, г. Брест, ул. Московская, 267