

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра физики

А.В. МИХАЙЛИЧЕНКО, Е.В. ВОЛКОВ

ЗАКОНЫ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 301

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом
государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2005

УДК 531.13(07)
ББК 22.2я7
К 14

Рецензент

кандидат физико-математических наук, доцент Юрк О.Д.

К 14 **Михайличенко А.В., Волков Е.В.**
Законы теплового излучения [Текст]: методические указания к
лабораторной работе / А.В. Михайличенко, Е.В. Волков / -
Оренбург: ОГУ, 2005. - 14 с.

Методические указания включают теоретическое изложение материала, описание методики проведения опытов и контрольные вопросы для самоподготовки.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Физика» для студентов всех специальностей.

ББК 22.2я7

© Михайличенко А.В.,
© Волков Е.В., 2005
© ГОУ ОГУ, 2005

1 Лабораторная работа № 301. Законы теплового излучения

1.1 Цель работы

1 Изучение зависимости потока теплового излучения от температуры для тела близкого к абсолютно черному телу.

2 Определение значения постоянных Стефана-Больцмана и Планка.

1.2 Тепловое излучение и его характеристики

Любые тела, имеющие абсолютную температуру выше нуля ($T > 0 \text{ К}$), излучают электромагнитные волны.

Тепловое излучение – это электромагнитное излучение, возникающее за счет внутренней (тепловой) энергии тела, т.е. энергии теплового движения его молекул.

Излучение или свечение тел, возникающее за счет других видов энергии отличных от тепловой, называется люминесцентным и далее рассматриваться не будет.

Тепловое излучение имеет сплошной спектр. Спектральный состав и интенсивность излучения зависят от температуры тела. По мере роста температуры увеличивается интенсивность излучения, а максимум интенсивности сдвигается в область более коротких длин волн. При температурах более 900 К наблюдается свечение в видимой области. Таким образом, в спектре излучения наблюдается неравномерное распределение энергии между различными длинами волн.

Тепловое излучение – единственный вид излучения, способный находиться в термодинамическом равновесии с веществом. Такое состояние термодинамического равновесия устанавливается в термоизолированной системе тел с одинаковой температурой. В равновесном состоянии энергия, поглощаемая телом за единицу времени, теряется за счет излучения за тот же промежуток времени, поэтому температура тела остается постоянной.

Для количественного описания теплового излучения вводятся интегральные и спектральные физические величины. Интегральные величины характеризуют тепловое излучение по всему диапазону длин волн $\lambda \in (0, \infty)$. К интегральным характеристикам относятся:

– поток энергии излучения или мощность излучения Φ_0 – количество энергии, излучаемой всей поверхностью тела за единицу времени

$$\Phi_0 = \frac{W}{t}, \text{ Вт};$$

– энергетическая светимость или излучательная способность R – мощность излучения, испускаемого с единицы площади поверхности тела

$$R = \frac{\Phi_{\text{э}}}{S}, \text{ Вт/м}^2.$$

Для описания плотности распределения энергии теплового излучения по всему спектру вводятся спектральные характеристики.

Спектральная плотность энергетической светимости r_{λ} – энергетическая светимость в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$

$$r_{\lambda} = \frac{dR}{d\lambda},$$

т.е. мощность излучения с единицы площади поверхности тела в узком участке спектра шириной $d\lambda$. Единица измерения $[r_{\lambda}] = \text{Дж/м}^2$.

Суммируя спектральную плотность энергетической светимости по всем длинам волн можно получить энергетическую светимость

$$R = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda.$$

Способность тел поглощать падающее на них излучение характеризуется спектральной поглощательной способностью (коэффициентом поглощения)

$$a_{\lambda} = \frac{d\Phi_{\text{погл}}}{d\Phi},$$

показывающей, какая доля падающего на тело потока излучения в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, поглощается телом. Коэффициент поглощения a_{λ} является безразмерной величиной и изменяется в диапазоне от 0 до 1. Из опыта известно, что величины r_{λ} и a_{λ} зависят от длины волны теплового излучения, температуры тела, его химического состава и состояния поверхности.

Для тела, полностью поглощающего при любой температуре T всё падающую на него энергию теплового излучения любой длины волны λ , коэффициент поглощения $a_{\lambda} = 1$. Такое тело называется абсолютно черным телом (АЧТ).

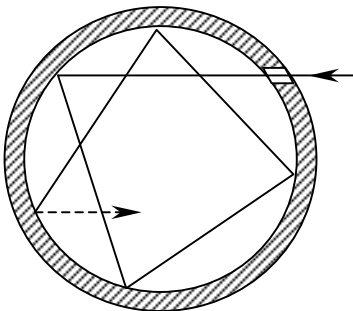


Рисунок 1

Абсолютно черных тел в природе не существует. Некоторые тела (сажа, платиновая чернь, черный бархат) в видимом диапазоне длин волн близки по свойствам к абсолютно черному телу.

Моделью абсолютно черного тела может служить замкнутая полость с небольшим отверстием и непрозрачными стенками (рисунок 1). Излучение, проникшее внутрь полости сквозь отвер-

ствие, испытывает многократные отражения от стенок, прежде чем выйдет обратно из отверстия. При каждом отражении происходит частичное поглощение энергии, в результате чего практически все излучение любой длины волны поглощается такой полостью. Эта модель тем ближе по характеристикам к АЧТ, чем больше отношение площади поверхности полости к площади отверстия.

1.3 Законы теплового излучения

Закон Кирхгофа: для любого тела независимо от его природы отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглощательной способности равно спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела при той же температуре и длине волны излучения

$$\frac{r_{\lambda}}{a_{\lambda}} = r_{\lambda}^{\text{АЧТ}}. \quad (1)$$

Сами величины r_{λ} и a_{λ} могут меняться в широких пределах при переходе от одного тела к другому, однако, их отношение по результатам экспериментов оказывается одинаковым для системы любых тел (в том числе и для абсолютно черного тела), находящихся в состоянии теплового равновесия между собой. То есть,

$$\frac{r_{\lambda_1}}{a_{\lambda_1}} = \frac{r_{\lambda_2}}{a_{\lambda_2}} = \dots = \frac{r_{\lambda_i}}{a_{\lambda_i}} = \dots = \frac{r_{\lambda}^{\text{АЧТ}}}{a_{\lambda}^{\text{АЧТ}}}.$$

Так как для абсолютно черного тела $a_{\lambda}^{\text{АЧТ}} = 1$, то получаем формулу (1).

Из закона Кирхгофа следует, что спектральная плотность энергетической светимости любого тела в любой области спектра всегда меньше аналогичной величины абсолютно черного тела, т.е. $a_{\lambda} < 1$. Кроме того, из (1) следует, что тело, слабо поглощающее тепловое излучение в каком либо диапазоне длин волн, также слабо излучает энергию в этом диапазоне.

Закон Стефана-Больцмана: энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры

$$R^{\text{АЧТ}} = \sigma T^4, \quad (2)$$

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

Экспериментальные исследования показывают, что распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела является неравномерным.

На графике (рисунок 2) представлены зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны $r_{\lambda}^{A\check{C}T} = f(\lambda)$ для различных температур.

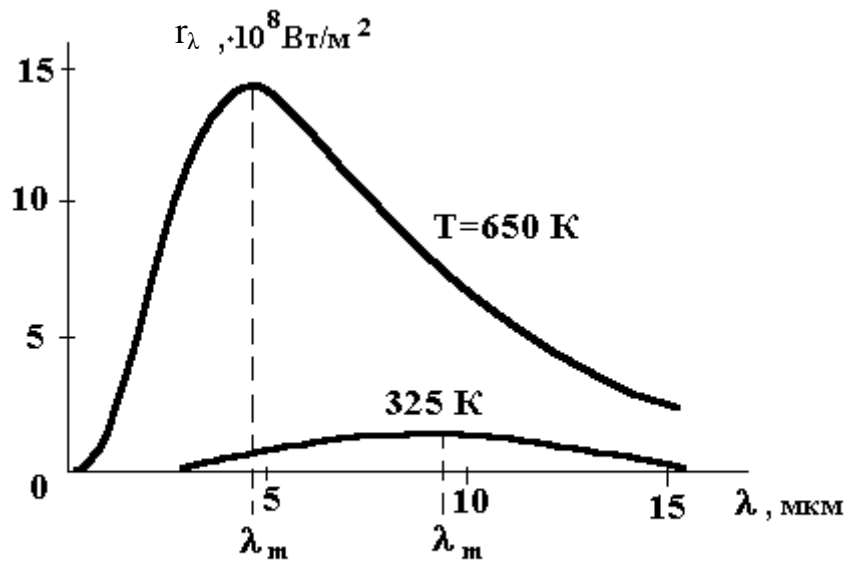


Рисунок 2

Кривые имеют явно выраженный максимум, который по мере повышения температуры смещается в область более коротких длин волн. Площадь ограниченная кривой и осью абсцисс, пропорциональна энергетической светимости абсолютно черного тела $R^{A\check{C}T}$ и, в соответствии с (2), четвертой степени температуры тела.

Закон смещения Вина: длина волны λ_m , соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости $r_{\lambda}^{A\check{C}T}$ абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре

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

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

В соответствии с законом смещения Вина при понижении температуры абсолютно черного тела в его спектре все сильнее преобладает длинноволновое излучение.

Формула Планка (основной закон теплового излучения) для спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела как функции длины волны и температуры

$$r_{\lambda}^{A\check{C}T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (3)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка,
 $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света,
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Формула Планка точно согласуется с экспериментальными данными во всем диапазоне длин волн $\lambda \in (0, \infty)$. Эта формула была получена Планком на основании выдвинутой им квантовой гипотезе, согласно которой энергия атомных осцилляторов может принимать лишь определенные дискретные значения, кратные целому числу элементарных порций энергии ε_0

$$\varepsilon = n\varepsilon_0 \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

При этом энергия излучается порциями (квантами) пропорциональными частоте излучения

$$\varepsilon_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

Закон Стефана-Больцмана может быть получен интегрированием функции Планка (3) по длине волны [1, 2]

$$R^{A\check{T}T} = \int_0^{\infty} r_{\lambda}^{A\check{T}T} d\lambda = \sigma T^4,$$

где $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}$ – постоянная Стефана-Больцмана,

откуда формула для постоянной Планка

$$h = \pi k \sqrt[3]{\frac{2\pi^2 k}{15c^2 \sigma}}.$$

Если взять производную по λ от функции Планка (3) при постоянной температуре T и приравнять ее нулю, то можно найти значение λ_{\max} при котором функция достигает максимума, то есть $r_{\lambda}^{A\check{T}T}$ максимальна. Если полученное значение λ_{\max} умножить на T , то получится закон смещения Вина

$$\lambda_{\max} T = b.$$

В теории теплового излучения наряду с понятием абсолютно черного тела часто пользуются другой идеализированной моделью реальных тел – серым телом.

Тело, коэффициент поглощения которого меньше единицы, но одинаков для всех длин волн и зависит только от температуры, материала и состояния поверхности, называют серым.

Коэффициент поглощения серых тел

$$a_{\lambda}^c = a^c = \text{const} < 1,$$

тогда энергетическая светимость серого тела

$$R^c = a^c R^{\text{АЧТ}}.$$

Откуда следует, что при одинаковой температуре сильнее излучают те серые тела, которые обладают большим коэффициентом поглощения.

Для серых тел закон Стефана-Больцмана выполняется с поправкой на меньшую мощность излучения

$$R^c = \alpha \sigma T^4,$$

где $\alpha < 1$ – коэффициент излучения (коэффициент черноты), зависит от материала и состояния поверхности. Например $\alpha = 0,04 \dots 0,06$ для полированного алюминия; $\alpha = 0,6 \dots 0,9$ для кирпича.

Реальное тело может быть близко по своим свойствам к серому телу лишь в сравнительно небольших интервалах длин волн излучения. Если коэффициент поглощения a_{λ} существенно зависит от длины волны λ , то распределение энергии по спектру отличается от планковского (3), а полный поток излучения (энергетическая светимость) растет при нагревании по закону, отличному от закона Стефана – Больцмана ($R \sim T^4$).

1.4 Лабораторная установка и методика проведения опыта

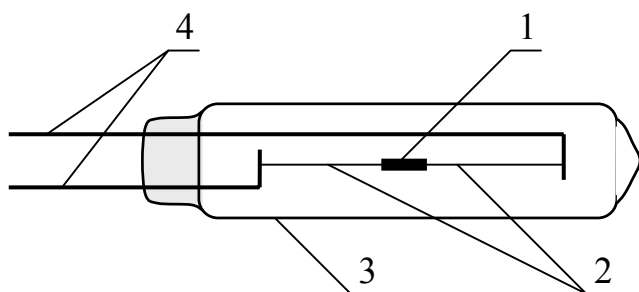


Рисунок 3

Основным измерительным элементом установки является термистор прямого подогрева (рисунок 3), который представляет собой маленький стержень 1 из полупроводникового материала, подвешенный на двух тонких вольфрамовых проволочках 2 внутри стеклянного вакуумированного баллона 3. Вольфрамовые проволочки прикреплены к выводам 4.

Электрическая схема лабораторной установки показана на рисунке 4. Полупроводниковый стержень термистора R_T нагревается током от ис-

точника постоянного напряжения ИН. Последовательно с термистором R_T включены переменные резисторы для грубой R_1 и точной R_2 регулировки тока I через термистор R_T и постоянный резистор R .

Цифровой вольтметр ЦВ (В7-35) с большим входным сопротивлением используется для измерения напряжений U_R на резисторе R напряжения U_T на термисторе R_T . Для этого вольтметр при помощи переключателя S подключается к соответствующему участку цепи. Переключатель S имеет среднее нейтральное положение, в котором цепь обесточена и крайние положения без фиксации. Цепь подключается к источнику напряжения ИН только в крайних положениях переключателя S , то есть непосредственно при измерении напряжений U_R и U_T . Это необходимо для ограничения времени протекания повышенных токов через термистор при высоких температурах излучателя.

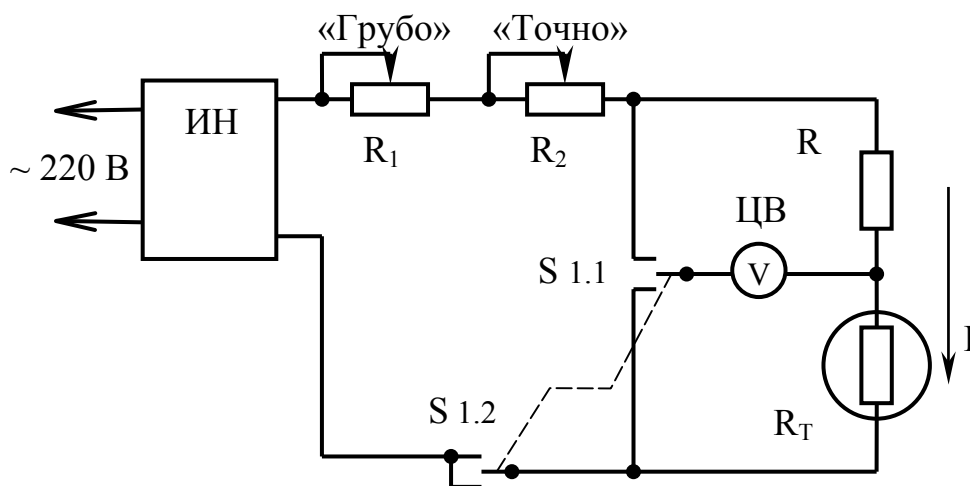


Рисунок 4

Температуру излучателя можно определить, измерив его сопротивление. Зависимость сопротивления полупроводников от температуры имеет вид

$$R = R_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right)$$

или

$$R = A \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad (4)$$

где T – температура излучателя, A и B – постоянные для данного термистора коэффициенты. $[A] = \text{Ом}$, $[B] = \text{К}$. После логарифмирования выражения (4) получается формула для определения температуры излучателя

$$T = \frac{B}{\ln \frac{R}{A}}. \quad (5)$$

Коэффициенты A и B определены из экспериментально полученной температурной зависимости $R = f(T)$ для данного экземпляра термистора и указаны на лабораторной установке.

Таким образом, в данной установке полупроводниковый стержень термистора служит одновременно излучателем, нагревателем и электрическим термометром.

Измеряя напряжение U_R на резисторе R , можно по закону Ома найти силу тока в цепи

$$I = \frac{U_R}{R}.$$

Поскольку сопротивление полупроводникового стержня намного больше сопротивления вольфрамовых проволочек, на которых он подвешен, можно приближенно считать, что падение напряжения на проволочках мало и тепловыделение происходит только в стержне. В стационарном режиме, когда $I = \text{const}$ и $T = \text{const}$, почти вся подводимая электрическая энергия рассеивается в виде теплового излучения, так как теплопроводность проволочек и разреженного газа в стеклянном баллоне мала. Следовательно, в первом приближении поток энергии излучения $\Phi_{\text{э}}$ (мощность излучения) можно найти, приравняв его мощности электрического тока, протекающего через термистор:

$$\Phi_{\text{э}} = IU_T.$$

Излучатель является серым телом с большим коэффициентом черноты, то есть приближенно можно считать его абсолютно черным телом к которому применим закон Стефана – Больцмана (2). Абсолютно черное тело с площадью поверхности S испускает поток энергии излучения

$$\Phi_{\text{э}} = S\sigma T^4,$$

то есть в стационарном режиме

$$IU_T = S\sigma T^4. \quad (6)$$

Это равенство, в котором пренебрегают теплопроводностью проволочек, выполняется тем лучше, чем выше температура, так как с ростом температуры поток излучения растет быстрее, чем теплопроводность.

Точность измерений повысится, если в уравнение (6) ввести поправки, учитывающие поглощаемое стерженьком излучение окружающих тел и теплопроводность проволочек.

С учетом вышеуказанных поправок уравнение теплового баланса в стационарном режиме примет вид:

$$IU_T + P_1 = S\sigma T^4 + P_2, \quad (7)$$

где в левой части – мощность поглощаемая стерженьком, в правой – излучаемая, P_1 – поток (мощность) излучения внешних тел, P_2 – мощность потерь из-за теплопроводности проволочек.

Согласно уравнению теплопроводности, количество тепла, проходящее по проволочкам в единицу времени, пропорционально разности температур на их концах и зависит от материала проволочек

$$P_2 = \beta \Delta T = \beta(T - T_0),$$

где T_0 – температура холодных концов, равная комнатной температуре, β – коэффициент пропорциональности, зависящий от материала и размеров проволочек. Значение β приведено на лабораторной установке.

Поток излучения окружающих тел, находящихся при температуре T_0 , поглощается поверхностью стерженька площадью S и одинаков при любой температуре стерженька. Если ток через стерженек не протекает ($I = 0$), то $T = T_0$ и $P_2 = 0$. Из уравнения (7) получаем

$$P_1 = S\sigma T_0^4.$$

Окончательно, уточненное уравнение теплового баланса принимает вид:

$$IU_T + S\sigma T_0^4 = S\sigma T^4 + \beta(T - T_0). \quad (8)$$

В данной лабораторной работе предлагается определить постоянную Стефана-Больцмана σ и показатель степени температуры в уравнении (8).

1.5 Порядок выполнения работы

Перед включением лабораторной установки в сеть регуляторы «Грубо» и «Точно» установить в крайнее левое положение. После включения прогреть установку в течение 5...10 минут. Во всех разрядах индикатора цифрового вольтметра должны высвечиваться нули. Допускается нестабильность показаний младшего разряда в ± 1 единицу.

Лабораторная работа заключается в измерении пар напряжений U_R и U_T и последующей обработке результатов измерений.

Для измерения U_R переключатель необходимо перевести в нижнее положение и удерживать в нем 5...10 с до тех пор пока показания вольтметра не перестанут изменяться. Занести значение U_R в таблицу. Не изменяя положения регуляторов перевести переключатель в верхнее положение и через 5...10 с отсчитать значение U_T и занести его в таблицу.

Аналогичные измерения проводят 8...10 раз при разных положениях регуляторов. Рекомендуется выбирать значения U_R кратные 0,1 В.

По окончании измерений установка отключается от сети.

Таблица 1 – Результаты измерений и вычислений

U_R , В	U_T , В	R_T , Ом	T , К	T^4 , К ⁴	$T^4 - T_0^4$, К	$I U_T$, Вт	$\beta(T - T_0)$, Вт	$I U_T - \beta(T - T_0)$, Вт

Сопротивление термистора находится по формуле

$$R_T = R \frac{U_T}{U_R},$$

где R – сопротивление постоянного резистора (указано на установке).

Температура T определяется по графику $R = f(T)$ или по формуле (5).

T_0 принимается равной 300 К.

Мощность электрического тока, протекающего через термистор

$$I U_T = \frac{U_T U_R}{R}.$$

Значения всех вычисленных величин заносятся в таблицу.

Для нахождения постоянной Стефана-Больцмана σ уравнение (8) записывается в виде

$$I U_T - \beta(T - T_0) = S \sigma (T^4 - T_0^4). \quad (9)$$

По результатам измерений и вычислений построить график зависимости $I U_T - \beta(T - T_0)$ от $(T^4 - T_0^4)$. Через точки на графике и начало координат провести прямую. По формуле (9) вычислить σ , подставив значения $I U_T - \beta(T - T_0)$ и $(T^4 - T_0^4)$ для некоторой точки на проведенной прямой.

Полученное значение сравнить с табличным $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$.

Сделать выводы по работе.

1.6 Контрольные вопросы

- 1 Каковы цель и содержание работы?
- 2 Какое излучение называется тепловым?
- 3 Чем объясняется непрерывный спектр теплового излучения?
- 4 Дайте определение энергетической светимости и излучательной способности. Какова их размерность?
- 5 Какое тело называется абсолютно черным?
- 6 Сформулируйте закон Кирхгофа.
- 7 Запишите закон Стефана-Больцмана и закон смещения Вина.
- 8 Как зависит сопротивление проводников и полупроводников от температуры?
- 9 Как определяется в данной работе температура и сопротивление термистора?

Список использованных источников

1 **Савельев, И.В.** Курс общей физики [Текст]: учебное пособие. В 3 т. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И.В. Савельев. - М.: Наука, 1988. - 496 с.

2 **Трофимова, Т.И.** Курс физики [Текст]: учебное пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - М.: Высш. шк., 2001. - 542 с.