

## ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА

**Цель работы:** определить численное значение  $N$  - показателя степени температуры в законе Стефана-Больцмана теплового излучения твердых тел для материала нити накаливания (вольфрам), т.е. установить конкретный вид зависимости мощности теплового излучения вольфрама от температуры.

**Приборы и принадлежности:** лампочка накаливания, амперметр, вольтметр, автотрансформатор, сосуд с водой.

### Введение

Все тела при любой температуре излучают электромагнитные волны длина которых заключена в диапазоне от 0 до  $\infty$ . Электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии, называется тепловым.

Важным отличием теплового излучения от других видов излучения электромагнитных волн является возможность его равновесия с излучающим телом. Предположим, что нагретое излучающее тело помещено в полость, ограниченную идеально отражающей оболочкой. С течением времени, в результате непрерывного обмена энергией между телом и излучением, наступит равновесие, т.е. тело в единицу времени будет поглощать столько же энергии, сколько и излучать. В этом случае можно сказать, что тело и излучение имеют одинаковую температуру. Таким образом, одним из параметров излучения является температура. Допустим, что равновесие по какой либо причине нарушилось и тело излучает, например, энергии больше, чем поглощает. В этом случае температура тела начнет понижаться. В результате будет ослабляться количество излучаемой телом энергии и снова наступит равновесие. Другими словами, состояние равновесия устойчиво, т.е. при любом его нарушении оно вновь восстанавливается.

Количественно тепловое излучение конкретного тела характеризуется рядом параметров, зависящих от длины волны  $\lambda$  и температуры  $T$ . Энергия  $r_{\lambda T}$ , испускаемая единицей поверхности тела в одну секунду

(т.е. мощность) волнами, заключенными в единичном интервале длин волн вблизи заданной длины волны  $\lambda$ , называется излучательной способностью тела, или спектральной плотностью излучения.

Мощность, излучаемая с единичной площади тела всеми электромагнитными волнами, длина которых занимает диапазон от 0 и до  $\infty$ , называется интегральной излучательной способностью или мощностью излучения  $W_T$ :

$$W_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda.$$

Если на тело падает энергия  $dE'_\lambda$ , то часть энергии  $dE''_\lambda$  отражается, а часть  $dE'''_\lambda$  поглощается

$$dE'_\lambda = dE''_\lambda + dE'''_\lambda. \quad (1)$$

Отношение отраженной части энергии к падающей называется отражательной способностью тела или коэффициентом отражения

$$\rho_{\lambda,T} = \frac{dE''_\lambda}{dE'_\lambda}.$$

Отношение поглощенной части энергии к падающей называется поглощательной способностью тела или коэффициентом поглощения

$$a_{\lambda,T} = \frac{dE'''_\lambda}{dE'_\lambda}.$$

Поделив правую и левую части (1) на  $dE'_\lambda$ , получим

$$1 = \frac{dE''_\lambda}{dE'_\lambda} + \frac{dE'''_\lambda}{dE'_\lambda}$$

или

$$a_{\lambda,T} + \rho_{\lambda,T} = 1.$$

Сумма отражательной и поглощательной способностей тела равна единице.

Тело, которое поглощает все падающие на него лучи, называется абсолютно черным телом. Для него  $\rho_{\lambda,T} = 0$ ,  $a_{\lambda,T} = 1$ .

Хорошей моделью абсолютно черного тела является полость, ограниченная оболочкой с небольшим отверстием, т.к. лучи, попадающие в полость через отверстие, практически полностью поглощаются в результате многократных переотражений от внутренней поверхности

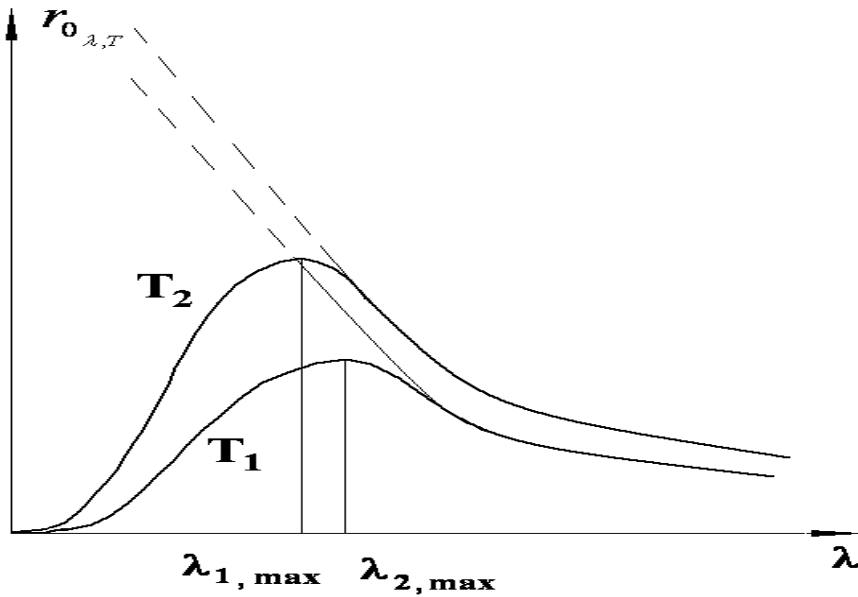


Рис. 1: Зависимость излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны при различных температурах ( $T_2 > T_1$ ).

оболочки и частичного (пусть слабого) поглощения при каждом отражении.

Для всех реальных тел  $a_{\lambda, T} < 1$  и в большинстве случаев зависит от длины волны и температуры, однако, есть тела, для которых  $a_{\lambda, T}$  постоянна для всех длин волн. Тогда ее обозначают  $a_T$ . Такие тела называются серыми.

Между излучательной и поглощательной способностями любого тела имеется определенная связь, устанавливаемая законом Кирхгофа: отношение излучательной способности тела к поглощательной способности не зависит от природы тела и является одной и той же для всех тел функцией длины волны и температуры

$$\frac{r_{\lambda, T}}{a_{\lambda, T}} = f(\lambda, T).$$

Как нетрудно видеть, это отношение равно излучательной способности абсолютно черного тела  $r_{0, \lambda, T}$ , для которого  $a_{\lambda, T} = 1$ , а  $r_{\lambda, T} = r_{0, \lambda, T}$ , т.е.

$$\frac{r_{\lambda, T}}{a_{\lambda, T}} = r_{0, \lambda, T}. \quad (2)$$

Экспериментальное и теоретическое изучение зависимости излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны и температуры сыграло важную роль в развитии физики. Экспериментальное изучение показало, что:

1) излучательная способность абсолютно черного тела является непрерывной функцией длины волны, т.е. излучение имеет место на всех длинах волн;

2) зависимость  $r_{0,\lambda,T}$  от длины волны имеет ярко выраженный максимум;

3) кривая зависимости  $r_{0,\lambda,T}$  от  $\lambda$  несимметрична относительно максимума: плавно уменьшается с ростом  $\lambda$  и резко спадает области коротких длин волн;

4) с ростом температуры максимум излучательной способности абсолютно черного тела смещается в сторону коротких длин волн. Эта закономерность носит название закона смещения Вина. Длина волны  $\lambda_{\max}$ , на которую приходится максимум спектральной плотности, обратно пропорциональна температуре

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

где  $b$  - постоянная Вина.

На рис. 1 сплошными кривыми изображены экспериментальные зависимости  $r_{0,\lambda,T}$  от  $\lambda$  для двух температур ( $T_2 > T_1$ ).

Теоретически задача о зависимости излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны и температуры решалась Рэлеем и Джинсом. Рассматривая тепловое излучение как электромагнитные волны, энергия которых может принимать любые значения, что находится в полном соответствии с классической электродинамикой, Рэлей и Джинс получили зависимость  $r_{0,\lambda,T} \sim T/\lambda^2$ , которая представлена пунктирной кривой на рис. 1. Как видно, в области коротких длин волн наблюдается значительное расхождение теоретических результатов с экспериментальными. Резкое расхождение экспериментальных данных с результатами волновой теории излучения вошло в историю физики под названием "ультрафиолетовая катастрофа".

Выход из создавшегося положения был найден Планком, который выдвинул гипотезу о квантовом характере излучения электромагнитных волн, предположив, что:

а) существует минимальное значение энергии электромагнитной волны, меньше которого тело излучать не может. Это минимальное значение энергии  $E_{\min}$  называется квантом излучения. Эта величина зависит от частоты излучения  $\omega$ :

$$E_{\min} = \hbar\omega,$$

где  $\hbar = 1,055 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - постоянная, называемая постоянной Планка.

б) энергия излучаемой электромагнитной волны может изменяться от одного значения до другого не плавно, а только скачкообразно, причем, минимальная величина скачка равна энергии кванта.

Таким образом, энергия электромагнитных волн может принимать значения только кратные целому числу квантов, а не любые, как считается в волновой теории Рэлея и Джинса.

Опираясь на эти принципиально новые теоретические положения Планк получил формулу зависимости  $r_{0,\lambda,T}$  от  $\lambda$ , блестяще согласующуюся с экспериментальными данными.

В области коротких длин волн (больших  $\omega$ ) становится особенно заметной разница между непрерывным и ступенчатым характером изменения энергии волны, т.к.  $\hbar\omega$  здесь велико. В области больших длин волн (малых  $\omega$ ) теория Планка и теория Рэлея-Джинса дают совпадающие результаты, т.к. здесь исчезают различия между непрерывным и квантовым (ступенчатым) характером изменения энергии волны, поскольку величина кванта  $\hbar\omega$  мала.

Характеристики излучения любых тел удобнее выражать через аналогичные хорошо изученные характеристики излучения абсолютно черного тела. Так с помощью закона Кирхгофа (формула 2) можно выразить излучательную способность любого тела через излучательную способность абсолютно черного тела:

$$r_{\lambda,T} = a_{\lambda,T} r_{0,\lambda,T}. \quad (3)$$

Теперь можно установить зависимость полной излучаемой мощности от температуры для любых тел

$$W_T = \int_0^{\infty} a_{\lambda,T} r_{0,\lambda,T} d\lambda = \gamma(T) W_0. \quad (4)$$

Здесь

$$\gamma(T) = \frac{\int_0^{\infty} a_{\lambda,T} r_{0,\lambda,T} d\lambda}{\int_0^{\infty} r_{0,\lambda,T} d\lambda},$$

а

$$W_0 = \int_0^{\infty} r_{0,\lambda,T} d\lambda$$

- мощность излучения абсолютно черного тела.

Для серых тел  $\gamma(T) = a_T$ , для остальных зависимость носит степенной характер

$$\gamma(T) = kT^\beta, \quad (5)$$

где  $\beta$  - какое-то (может быть дробное) число.

Мощность излучения абсолютно черного тела удовлетворяет закону Стефана-Больцмана

$$W_0 = \sigma T^4. \quad (6)$$

Здесь  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$  Вт / (м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) - постоянная Стефана-Больцмана. Используя (4), (5) и (6), запишем:

$$W_T = k\sigma T^{4+\beta}, \quad (7)$$

или, обозначив  $N = 4 + \beta$ :

$$W_T = k\sigma T^N. \quad (8)$$

Итак, интегральная излучательная способность (мощность теплового излучения) реальных тел прямо пропорциональна температуре в степени  $N$ , где  $N$  представляет собой число, характерное для каждого тела.

### Приборы и методы измерений

Если тело с температурой  $T_1$  поместить в полость, имеющую температуру  $T_2$ , то между телом и полостью будут происходить процессы теплообмена: теплопроводность, конвекция, взаимный обмен лучистой энергией.

Если выбрать  $T_1 \gg T_2$ , то преобладающим из всех упомянутых процессов будет тепловое излучение первого тела. Мощность теплового излучения тела тогда можно представить, используя (8) как

$$W = k\sigma T^N S, \quad (9)$$

где  $S$  - площадь излучающей поверхности.

Если энергия, теряемая телом, восполняется путем нагревания тела током, то на основании баланса подводимого и излучаемого тепла имеем:

$$IU = k\sigma T^N S, \quad (10)$$

где  $I$  - сила тока,  $U$  - напряжение. Учитывая закон Ома и зависимость сопротивления проводника от температуры, напишем:

$$\frac{U}{I} = R_T = R_0\alpha T, \quad (11)$$

откуда

$$T = \frac{U}{IR_0\alpha}. \quad (12)$$

Здесь  $R_T$  - сопротивление при температуре  $T$ ,  $R_0$  - сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления. Подставив (12) в (10), получим:

$$IU = k\sigma \left( \frac{U}{JR_0\alpha} \right)^N S. \quad (13)$$

Для определения показателя степени  $\alpha$  (что и является целью нашей работы) прологарифмируем (13):

$$\lg(IU) = N \lg \frac{U}{I} + N \lg \frac{1}{R_0\alpha} + \lg k\sigma S. \quad (14)$$

В этом выражении переменными являются члены, содержащие  $I$  и  $U$ , остальные величины и их логарифмы постоянны. Введем новые обозначения:

$$A = N \lg \frac{1}{R_0\alpha} + \lg k\sigma S, \quad y = \lg(IU), \quad x = \lg \left( \frac{U}{I} \right).$$

Тогда (14) приобретает вид:

$$y = Nx + A. \quad (15)$$

Это уравнение прямой на плоскости  $X, Y$ . Тангенс угла наклона прямой к оси  $X$  равен  $N$ . Следовательно, экспериментально  $N$  можно определить, построив график зависимости

$$\lg(IU) = f \left( \lg \frac{u}{I} \right)$$

и определив тангенс угла его наклона к оси абсцисс.

Основной частью лабораторной установки является лампочка накаливания, погруженная в сосуд с водой. Таким образом, нить накала, изготовленная из вольфрама, является излучающим телом, температура которого поддерживается постоянной за счет выделения тепла протекающим по нити накала током. Окружающей это тело полостью является баллон лампочки, температура которого остается в течение опыта постоянной, т.к. лампочка погружена в сосуд с водой, имеющей большую теплоемкость.

Лампочка подключается в сеть через автотрансформатор, которым регулируется напряжение на лампочке. Для измерения тока и напряжения на лампочке служат амперметр и вольтметр переменного тока.

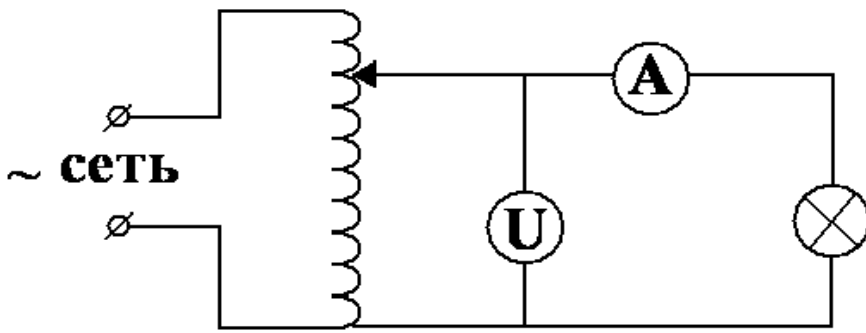


Рис. 2: Схема экспериментальной установки.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую схему (рис. 2).
2. Погрузить лампочку в сосуд с водой.
3. При помощи автотрансформатора изменять напряжение на лампочке в диапазоне 100 - 200 В с интервалом около 10 вольт, записывая в табл. 1 значения  $I$  и  $U$ .
4. Уменьшить напряжение до 0 и разомкнуть цепь.

### Обработка результатов

1. Заполнить графы таблицы.
2. По данным, полученным из таблицы, построить график:

$$\lg(IU) = f\left(\lg \frac{U}{I}\right),$$

выбрав удобные масштабы по каждой из осей.

3. Определить  $N$ , как тангенс угла наклона графика  $\lg(IU)$  к оси  $\lg(U/I)$ .

### ТАБЛИЦА

U	I	IU	U/I	$\lg(IU)$	$\lg(U/I)$

### Вопросы

1. Что такое излучательная, поглощательная и отражательная способности тела?
2. Что такое абсолютно черное тело? Что служит моделью абсолютно черного тела?



3. Сформулируйте закон Кирхгофа.
4. Напишите закон Стефана-Больцмана для абсолютно черного тела и для реального тела.
5. Какой вид имеет экспериментальная зависимость излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны?
6. В чем заключается закон смещения Вина?
7. Каковы основные положения теории Рэля-Джинса и полученные ими результаты?
8. Как согласуются теоретические результаты Рэля-Джинса с экспериментальными?
9. Каковы основные положения гипотезы Планка о квантах излучения?
10. Почему теория Рэля-Джинса согласуется с экспериментом при больших длинах волн и расходится при коротких длинах волн?

### **Литература**

1. И. В. Савельев, Курс общей физики, т. 3, 1987, § 1-7.
2. Т. И. Трофимова, Курс физики, 1985, § 197-200.
3. Н. П. Калашников, М. А. Смондырев, т. 2, 2003, § 27.1-27.4.