

## Работа № 39

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА

**Цель работы** – экспериментальная оценка величины постоянной Планка с использованием законов теплового излучения, сравнение полученного значения с табличным.

#### Теория эксперимента

В основе теории предлагаемого эксперимента по определению постоянной Планка лежат законы теплового излучения. Формула Планка для излучения абсолютно черного тела имеет вид

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2 c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}, \quad (1)$$

где  $f(\omega, T)$  – спектральная излучательная способность черного тела, т. е. поток энергии с единицы площади черного тела в единице спектрального диапазона, имеющая размерность Вт/(м<sup>2</sup> · с<sup>-1</sup>);  $k$  – постоянная Больцмана;  $\hbar = h/(2\pi)$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света. Интенсивность света  $J$ , излучаемого в узком интервале частот  $d\omega$  абсолютно черным телом при температуре  $T$ , пропорциональна  $f(\omega, T)$ .

Для частот, соответствующих длинам волн порядка 1 мкм и температур порядка 10<sup>3</sup> К,  $\exp(\hbar\omega/kT) \gg 1$ , следовательно,

$$J \sim \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{kT}\right). \quad (2)$$

Энергетическая светимость абсолютно черного тела, т.е. поток энергии с единицы поверхности тела, определяется выражением

$$R_e = \int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega = \sigma T^4, \quad (3)$$

где

$$\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60 c^2 \hbar^3}. \quad (4)$$

Выражение (3) представляет собой закон Стефана–Больцмана,  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана.

Если тело не является абсолютно черным, то его энергетическая светимость может быть определена по формуле

$$R'_e = \int_0^{\infty} a(\omega, T) f(\omega, T) d\omega, \quad (5)$$

где  $a(\omega, T)$  – спектральная поглощательная способность тела.

Так как  $a(\omega, T) < 1$ , энергетическая светимость  $R'_e$  меньше энергетической светимости абсолютно черного тела при той же температуре. Отношение  $R'_e/R_e$  называется степенью черноты тела. Степень черноты тела можно определить по формуле

$$a_T = \frac{R'_e}{R_e} = \frac{\int_0^{\infty} a(\omega, T) f(\omega, T) d\omega}{\int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega}. \quad (6)$$

Из формул (3) и (6) следует, что

$$R'_e = a_T R_e = a_T \sigma T^4. \quad (7)$$

Если поглощательная способность тела не зависит от частоты, т. е.  $a(\omega, T) = a(T)$ , то такое тело называют серым. В этом случае в выражении (6) можно  $a(T)$  вынести за знак интеграла. В результате получим равенство  $a_T = a(T)$ , т. е. степень черноты серого тела совпадает с его поглощательной способностью.

Мощность, излучаемая телом, пропорциональна энергетической светимости:

$$P = R'_e S = a_T \sigma T^4 S, \quad (8)$$

где  $S$  – площадь излучающей поверхности. Если в интересующем нас интервале температур степень черноты тела от температуры зависит слабо, то приближенно можно считать ее постоянной величиной, равной среднему значению в этом интервале. Выражение (8) в этом случае можно разрешить относительно температуры  $T$ . Тогда

$$T = \left( \frac{P}{a_T \sigma S} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (9)$$

Полученное выражение подставим в формулу (2):

$$J \sim \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{kT}\right) \sim \exp\left[-\frac{\hbar\omega}{k} \left(\frac{a_T \sigma S}{P}\right)^{\frac{1}{4}}\right]. \quad (10)$$

Если излучение в узком диапазоне частот  $d\omega$  вблизи частоты  $\omega$  попадает на фотоприемник, его сигнал пропорционален интенсивности излучения, описываемой формулой (10):

$$U_\phi = C \exp\left[-\frac{\hbar\omega}{k} \left(\frac{a_T \sigma S}{P}\right)^{\frac{1}{4}}\right], \quad (11)$$

где  $U_\phi$  – показания фотоприемника;  $C$  – коэффициент пропорциональности. Прологарифмируем выражение (11).

Тогда

$$\ln U_{\phi} = \ln C - \frac{\hbar\omega}{k} \left( \frac{a_T \sigma S}{P} \right)^{\frac{1}{4}} = \ln C - \frac{\hbar\omega}{k} (a_T \sigma S)^{\frac{1}{4}} P^{-\frac{1}{4}}. \quad (12)$$

Из выражения (12) следует, что график зависимости  $\ln U_{\phi}$  от  $P^{-\frac{1}{4}}$  имеет вид прямой линии (рис. 1), причем угловой коэффициент наклона этой прямой равен по модулю

$$K = \frac{\Delta(\ln U_{\phi})}{\Delta\left(P^{-\frac{1}{4}}\right)} = \left| \frac{\ln U_{\phi 2} - \ln U_{\phi 1}}{P_2^{-\frac{1}{4}} - P_1^{-\frac{1}{4}}} \right| = \frac{\hbar\omega}{k} (a_T \sigma S)^{\frac{1}{4}}. \quad (13)$$

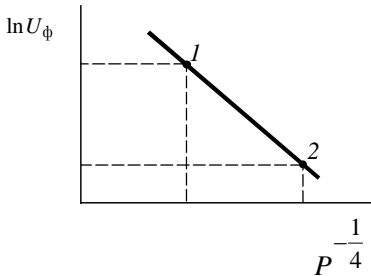


Рис. 1

Подставив в формулу (13) значение  $\sigma$  из формулы (4) и используя известное соотношение  $\omega = 2\pi c/\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны, выразим постоянную Планка

$$\hbar = \frac{15\lambda^4}{4\pi^6 c^2 a_T S} K^4. \quad (14)$$

Мощность излучения  $P$  в условиях теплового равновесия можно считать равной подводимой мощности. В настоящей работе она выделяется за счет протекания по нагреваемому телу электрического тока. Поэтому мощность можно определить по формуле  $P = IU$ , где  $I$  – сила тока;  $U$  – напряжение.

## Описание экспериментальной установки

Измерение величин, необходимых для построения графика, производят на установке, схема которой показана на рис. 2, где БП – блок питания лампы накаливания Л; А – амперметр; U – вольтметр для измерения напряжения на лампе; С – светофильтр; ФД – фотодиод; ЭБ – электронный блок фотоприемника;  $U_{\phi}$  – вольтметр, регистрирующий напряжение на выходе электронного блока.

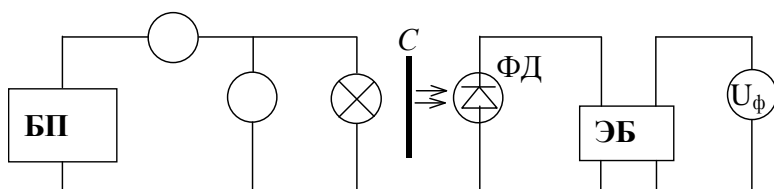


Рис. 2

Средняя длина волны  $\lambda$  полосы пропускания светофильтра равна 1 мкм. Значения площади излучающей поверхности лампочки  $S$  и ее поглощательной способности  $a_T$  даны в паспорте установки.

### Задания

1. Измерить ряд значений величин, необходимых для построения графика.

2. Построить график зависимости  $\ln U_{\phi}$  от  $P^{-\frac{1}{4}}$ .

3. По графику определить угловой коэффициент  $K$  наклона прямой.

4. По формуле (14) оценить величину постоянной Планка  $\hbar$ .

5. Полученное значение  $\hbar$  сравнить с табличным.

## Контрольные вопросы

1. Какова цель работы?
2. Что такое спектральная излучательная способность?
3. Напишите формулу Планка для спектральной излучательной способности черного тела.
4. Что такое поглотительная способность?
5. Что такое энергетическая светимость?
6. Сформулируйте закон Стефана – Больцмана.
7. Какие факторы могут привести к погрешности в определении постоянной Планка?

## Литература

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 5. – М.: Астрель, 2001 (§ 1.1, 1.4).
2. *Трофимова Т. И.* Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990 (§ 197, 200).