

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.3

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

#### Введение

Электромагнитное излучение нагретых тел называют тепловым излучением. Спектральной характеристикой теплового излучения поверхности тела с температурой  $T$  является *лучеиспускательная способность* тела:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{dW_{\text{изл}}}{d\lambda},$$

где  $dW_{\text{изл}}$  — энергия электромагнитного излучения, испускаемого с единицы поверхности тела в интервале длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda+\Delta\lambda$ , в единицу времени.

Спектральной характеристикой поглощения является *поглощательная способность* тела:

$$a(\lambda, T) = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}},$$

показывающая, какая доля энергии  $dW$  электромагнитных волн (в интервале длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda+\Delta\lambda$ ), падающих на единицу поверхности тела в единицу времени, поглощается телом. Часто вместо  $\varepsilon(\lambda, T)$  и  $a(\lambda, T)$  вводят  $\varepsilon(\nu, T)$  и  $a(\nu, T)$ .

Опыт показывает, что лучеиспускательная и поглощательная способности тела зависят от длины излучаемых и поглощаемых волн, температуры тела, его химического состава и состояния поверхности. Тело называется абсолютно черным, если оно при любой температуре полностью поглощает всю энергию падающих на него электромагнитных волн независимо от их частоты. У абсолютно черного тела поглощательная способность равна единице, а лучеиспускательная способность  $\varepsilon_0(\lambda, T)$  зависит только от длины волны  $\lambda$ , и абсолютной температуры  $T$ .

По закону Кирхгофа, отношение лучеиспускательной способности любого тела, находящегося в равновесии с излучением, к его поглощательной способности в узком интервале длин волн ( $\lambda$ ,  $\lambda+\Delta\lambda$ ) не зависит от материала тела и равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела  $\varepsilon_0(\lambda, T)$ :

$$\frac{\varepsilon(\lambda, T)}{a(\lambda, T)} = \varepsilon_0(\lambda, T). \quad (1)$$

По закону Стефана—Больцмана интегральная лучеиспускательная способность черного тела (т.е. энергия, испускаемая единицей поверхности тела в единицу времени во всей области частот) пропорциональна четвертой степени температуры тела:

$$\varepsilon_0(T) = \int_0^{\infty} \varepsilon_0(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4, \quad (2)$$

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

Для реальных тел отношение интегральной лучеиспускательной способности к лучеиспускательной способности черного тела при той же температуре меньше единицы. На рис. 4.3.1 показано, как меняется это отношение в зависимости от температуры вольфрама — металла, из которого сделана нить накала лампы. В реальных условиях мощность, идущая на нагревание нити накала, поверхность которой равна  $S$ , почти полностью передается в окружающее пространство в виде теплового излучения. Тогда

$$IU = a(T)\sigma T^4 S. \quad (3)$$

Это уравнение дает возможность экспериментального определения постоянной Стефана—Больцмана:

$$\sigma = \frac{IU}{a(T)T^4 S}. \quad (4)$$

Измерение  $\sigma$  составляет одно из заданий настоящей работы.

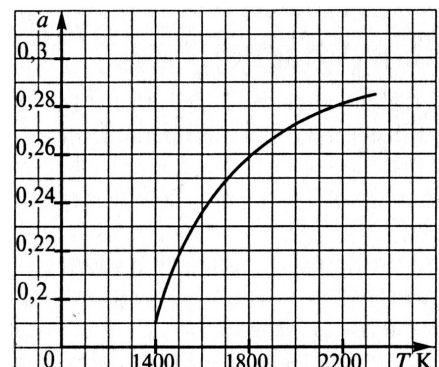


Рис. 4.3.1

Поиски явного вида функции  $\varepsilon_0(\lambda, T)$  привели к установлению квантового характера излучения и поглощения энергии атомами и молекулами. Функция  $\varepsilon_0(\lambda, T)$ , полученная М.Планком, имеет вид:

$$\varepsilon_0(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1}, \quad (5)$$

где  $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - постоянная Планка,  $c = 299792458$  м/с — скорость света в вакууме;  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана.

Спектральную лучеиспускающую способность реального металла можно получить, умножив  $\varepsilon_0(\lambda, T)$  на поглощательную способность металла  $a(\lambda, T)$ :  $\varepsilon(\lambda, T) = a(\lambda, T) \varepsilon_0(\lambda, T)$ .

Отношение спектральных лучеиспускающих способностей металла для разных длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  при одной и той же температуре равно:

$$\varepsilon_{12} = \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right) = \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \frac{a_{1T} \exp(\frac{hc}{kT\lambda_2}) - 1}{a_{2T} \exp(\frac{hc}{kT\lambda_1}) - 1}. \quad (6)$$

Учитывая, что для длин волн, лежащих в видимой части спектра, и температур, превышающих комнатную,  $\exp(\frac{hc}{kT\lambda}) - 1$  значительно превышает единицу, из уравнения (6) легко получить отношение спектральных лучеиспускающих способностей металла при различных температурах  $T_1$  и  $T_2$ :

$$R = \frac{(\varepsilon_{12})_{T_1}}{(\varepsilon_{12})_{T_2}} = \frac{(a_1/a_2)_{T_1}}{(a_1/a_2)_{T_2}} \exp \left\{ \frac{hc}{k} \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right\}. \quad (7)$$

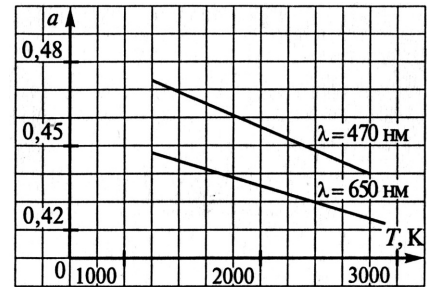


Рис. 4.3.2

Графики зависимости  $a(\lambda, T)$  от температуры  $T$  (в интервале 1700 — 2500 К) для вольфрама для различных длин волн приведены на рис. 4.3.2. Из рисунка видно, что отношение  $\frac{(a_1/a_2)_{T_1}}{(a_1/a_2)_{T_2}}$  близко к единице. Поэтому если экспериментально измерено отношение лучеиспускающих способностей, стоящее в левой части выражения (6), то из уравнения (7) можно вычислить постоянную Планка:

$$h = \frac{\gamma \ln(R)}{1/T_1 - 1/T_2} \quad (8),$$

где  $\gamma = \frac{k}{c(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)}$  (9)

Определение  $h$  составляет второе задание в данной работе.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.

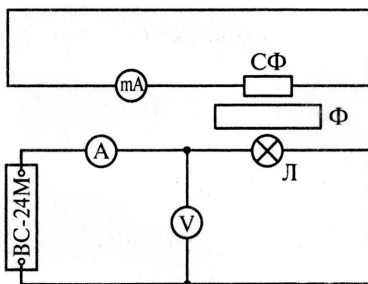


Рис. 4.3.3

Измерительная установка собрана по схеме, показанной на рис.4.3.3. В данной работе для опытов с тепловым излучением используется светоизмерительная лампа СИ-6-100 с вольфрамовой ленточной нитью накала площади  $S$ . Лампа закреплена в штативе и окружена металлической ширмой с окошком. Перед лампой установлен держатель со сменными светофильтрами (фото 1). Напряжение на лампу подается с полупроводникового выпрямителя ВС-24М, который включается в сеть через ЛАТР (в режиме пониженного напряжения). При проведении измерений потенциометр выпрямителя ВС-24М должен оставаться в установленном (по метке) фиксированном положении. Напряжение на лампе изменяют, поворачивая ручку регулировки напряжения на верхней панели ЛАТРа. Мощность, необходимая для нагревания вольфрамовой нити, определяется вольтметром и амперметром.

Общий вид установки показан на фото 2.



Фото 1



Фото 2

Для выделения теплового излучения, соответствующего определенному интервалу длин волн, в работе используются синий и красный фильтры со средними длинами волн  $\lambda_{\text{син}} = 460 \text{ нм}$ ,  $\lambda_{\text{крас}} = 610 \text{ нм}$ . Об отношении спектральных испускательных способностей вольфрама в выделенных интервалах длин волн можно судить по силе тока в цепи селенового фотоэлемента, поставленного на пути светового потока. Чувствительность фотоэлемента к синему и красному свету почти одинакова. Поэтому отношение фототоков при красном ( $i_{\text{кр}}$ ) и синем ( $i_{\text{син}}$ ) светофильтрах будет зависеть от температуры так же, как и отношение спектральных испускательных способностей в этих интервалах длин волн. Для измерения фототоков рекомендуется использовать многопредельные микроамперметры.

В работе предлагается метод фотометрического сравнения яркостей исследуемого тела и эталонной лампы при помощи оптического пирометра. Оптический пирометр с исчезающей нитью состоит из корпуса П, в котором помещена эталонная лампа накаливания Л с дугообразной нитью (см. рис.4.3.4).

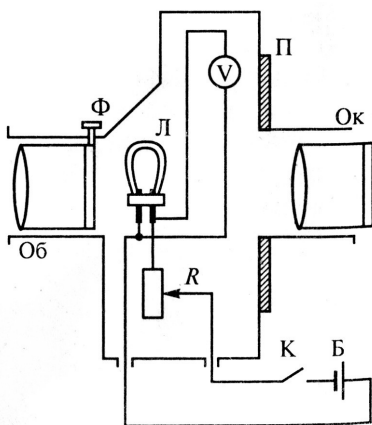


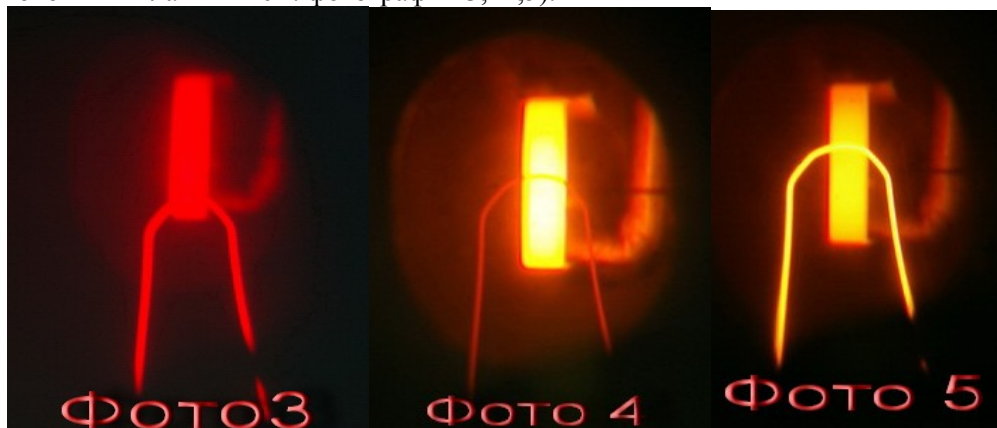
Рис. 4.3.4

Перемещая объектив пирометра Об, можно получить изображение исследуемой вольфрамовой нити в плоскости волоска эталонной лампы. Для получения резкого изображения волоска эталонной лампы и изображения исследуемой нити, находящихся в одной плоскости, перемещают окуляр Ок. Эталонная лампа через ключ К питается током от батареи или стабилизированного источника ( $U = 3 \text{ В}$ ). Накал нити регулируется реостатом R посредством кольца, находящегося в передней части пирометра.

Температуру нити, соответствующую температуре абсолютно черного тела в монохроматическом свете с длиной волны  $\lambda = 650 \text{ нм}$  (перед окуляром в пирометре установлен красный светофильтр, который можно при необходимости вывести поворотом кольца на окуляре), отсчитывают по вольтметру со шкалой, проградуированной в градусах Цельсия. В пирометре имеются две градуированные шкалы: от 0 до  $1400^\circ\text{C}$  (нижняя шкала) - отмечена синей точкой; от  $1400^\circ$  до  $2000^\circ\text{C}$  (верхняя шкала) - отмечена красной точкой. При измерении температуры свыше  $1400^\circ\text{C}$  необходимо использовать дымчатый нейтральный фильтр ДФ. Для установки дымчатого фильтра указательную точку на головке ДФ следует совместить с красной точкой на корпусе пирометра, после чего с помощью линзы объектива следует вновь произвести фокусировку и производить отсчет по верхней шкале. При измерении температуры от 0 до  $1400^\circ$  дымчатый нейтральный фильтр не используется, следовательно, указательная точка на головке ДФ должна быть совмещена с синей точкой на корпусе пирометра.

При измерении температуры раскаленного тела регулируют ток эталонной лампы пирометра (кольцом реостата R) до тех пор, пока яркость нити эталонной лампы не совпадет с яркостью

исследуемого тела (верхняя часть дуги нити эталонной лампы исчезнет на фоне изображения вольфрамовой нити лампы – см. фотографии 3, 4, 5).



По шкале пирометра измеряют так называемую яркостную температуру тела  $T_{я}$ . Под яркостной температурой понимают такую температуру абсолютно черного тела, при которой испускательная способность абсолютно черного тела равна испускательной способности исследуемого тела при его истинной температуре в единичном интервале длин волн.

Между яркостной и действительной температурой тела  $T$  существует зависимость:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{я}} + \frac{\lambda k}{hc} \ln A_{\lambda T}$$

где  $\lambda = 650\text{ нм}$ . Эта зависимость изображена на графике, прилагаемом к установке (см. Приложение к данной работе), и используется для определения истинной температуры вольфрама  $T$  по измеренным значениям  $T_{я}$ .

## ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ.

### ВНИМАНИЕ!

#### 1. Напряжение на лампу подается следующим образом:

- включите в сеть ЛАТР;
- поставьте тумблер СЕТЬ на верхнем выпрямителе В-24 в положение ВКЛ (ручку регулировки напряжения не поворачивать!!!);
- тумблер включения сети на ЛАТРе поставьте в положение ВКЛ, предварительно установив ручку регулировки снимаемого с него напряжения в крайнее левое положение;
- медленно вращая ручку регулировки напряжения, добейтесь значения тока через лампу 7,6 А.

#### 2. Измерение яркостной температуры нити накаливания исследуемой лампы:

- ИЗМЕРЕНИЯ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НИТИ НАКАЛИВАНИЯ ЛАМПЫ ПРОВОДИТЕ ДЛЯ ТОКОВ ОТ 6,5 ДО 8,6 А, соответственно таблице:

№№	1	2	3	4	5	6	7
I (А)	6,5	6,8	7,2	7,6	8,0	8,3	8,6

- Для значений токов от 6,5 до 8,5 А измерения температуры нити накаливания лампы проводите **без использования дымчатого фильтра (по нижней шкале пирометра)**;
- Для значений токов от 8,5 до 9 А измерения температуры нити накаливания лампы проводите **с введённым дымчатым фильтром по верхней шкале пирометра** (переключатель на корпусе пирометра установить напротив красной точки).

#### Задание 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА.

Перед началом измерений следует проверить, чтобы при установке в рейтерах на оптической скамье окошко с фильтрами перед селеновым фотоэлементом СФ, нить исследуемой лампы, входное окно и нить пирометра находились приблизительно на одной прямой.

Уберите фотоэлемент СФ с оптической скамьи. Подав на лампу СИ-6-100 небольшое напряжение, получите резкое изображение нити лампы в плоскости окуляра пирометра. Вращая ручку потенциометра ЛАТРа, медленно увеличивайте напряжение на лампе. Проведите измерения 5-7 различных напряжений, при которых сила тока в лампе меняется от 6,5 до 8,5 А.

При каждом измерении поступайте следующим образом:

– установив определенную силу тока, подождите 2-3 минуты, затем измерьте яркостную температуру вольфрамовой нити. Действительную температуру найдите по графику №1. Для каждого значения температуры исследуемой нити по графику №2 найдите значение  $A_T$ .

– поставьте фотоэлемент перпендикулярно свету, идущему от лампы и измерьте силу тока в цепи фотоэлемента при красном ( $\lambda_{\text{крас}} = 610$  нм) и синем ( $\lambda_{\text{син}} = 460$  нм) освещении. Замену фильтров проводите поворотом рукоятки на насадке фотоэлемента. Во время измерений токов пользуйтесь различными пределами измерений микроамперметра.

Для каждого значения мощности, поглощаемой лампой, по формуле (4) вычислите постоянную Стефана-Больцмана. Площадь излучающей поверхности вольфрамовой ленты  $S = 1,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ .

Данные измерений и вычислений  $I$ ,  $U$ ,  $i_{\text{кр}}$ ,  $i_{\text{син}}$ ,  $T_{\text{я}}(\text{К})$ ,  $T_{\text{я}}(^{\circ}\text{C})$ ,  $T(\text{К})$ ,  $A_T$  занесите в таблицу 1. Коэффициент полного излучения  $A_T$  как функция температуры дан на графике в Приложении. Рассчитайте среднее значение  $\sigma$ . Взяв табличное значение постоянной Стефана-Больцмана, оцените точность проведенных измерений.

ТАБЛИЦА 1.

№№	1	2	3	4	5	6	7
$I$ (А)	6,5	6,8	7,2	7,6	8,0	8,3	8,6
$U$ (В)							
$T_{\text{я}}$ (С)							
$T_{\text{я}}$ (К)							
$T$ (К)							
$A_T$							
$\sigma$ эксперим.							
$i_{\text{кр}}$ (делений)							
$i_{\text{син}}$ (делений)							
$(\varepsilon_{12})_T = i_{\text{кр}}/i_{\text{син}}$							

## Задание 2. ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА.

Оценку величины постоянной Планка проводите для температур в диапазоне от 1400 К до 1700 К. При более низких температурах пирометр дает большую погрешность, а при более высоких - может перегореть эталонная лампа.

Рассчитайте по формуле (9) величину  $\gamma$ , не зависящую от температуры, при этом примите  $\lambda_1 = \lambda_{\text{кр}}$  и  $\lambda_2 = \lambda_{\text{син}}$ . Значения остальных констант возьмите из физических справочников.

Используя результаты измерений, полученные в задании 1, вычислите по формуле (8) величину постоянной Планка для пяти комбинаций температур, при которых проводились измерения (например, 3-7; 4-7; 5-7; 3-6; 4-6). Обратите внимание: с ростом температуры отношение  $(\varepsilon_{12})_T = i_{\text{кр}}/i_{\text{син}}$  должно уменьшаться; те столбцы таблицы 1, для которых это не выполняется, не могут быть использованы для вычисления постоянной Планка. Данные вычислений занесите в таблицу 2.

ТАБЛИЦА 2.

пары	3-7	4-7	5-7	3-6	4-6
$1/T_1, K^{-1}$					
$1/T_2, K^{-1}$					
$R = \frac{(\varepsilon_{12})_T}{(\varepsilon_{12})_T}$					
$h$					

Зная табличное значение постоянной Планка, оцените точность полученных результатов.

### ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Что понимают под термином тепловое излучение? Сформулируйте основные законы теплового излучения.
2. Найдите интегральную лучеиспускательную способность абсолютно черного тела, находящегося при температуре  $20^\circ C$ .
3. Какую температуру должно иметь абсолютно черное тело, чтобы максимум лучеиспускательной способности  $\varepsilon_0(\lambda, T)$  соответствовал «красной» области спектра видимого излучения?
4. Применим ли закон смещения Вина ко всем излучающим телам?
5. Начертите график, показывающий распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела. Как изменится этот график с увеличением температуры?
6. Какие гипотезы использовал Планк при выводе формулы для лучеиспускательной способности абсолютно черного тела?