

Лабораторная работа №3.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И.Л. Дорошевич

Цели работы:

1. Изучить основные законы равновесного теплового излучения.
2. Построить спектральные кривые излучательной способности нагретой нихромовой спирали при различных фиксированных температурах.
3. Проверить закон смещения Вина и закон Стефана – Больцмана.

Методическое обоснование работы

Тепловым излучением называют электромагнитное излучение, испускаемое телами за счет их внутренней энергии (энергии теплового движения их атомов и молекул).

Равновесным называется тепловое излучение тел, находящихся в термодинамическом равновесии со своим излучением, т. е. когда распределение энергии между телом и его излучением является постоянным для каждой длины электромагнитной волны (частоты). В дальнейшем мы будем рассматривать только равновесное тепловое излучение.

Тепловое излучение имеет непрерывный (сплошной) спектр, распределение электромагнитной энергии в котором характеризуется непрерывной функцией частоты ν или длины волны λ . Введем спектральные характеристики теплового излучения тела при фиксированной температуре T .

Излучательная способность тела $r_{\nu,T}$ (спектральная излучательная способность тела) – спектральная характеристика теплового излучения, равная

$$r_{\nu,T} = \frac{d\Phi_{\nu}}{dS d\nu}, \quad (1)$$

где $d\Phi_\nu$ – поток электромагнитной энергии, излучаемый элементом поверхности тела площадью dS в узком интервале частот от ν до $\nu + d\nu$. В СИ $[r_{\nu,T}] = \text{Дж}/\text{м}^2$.

Излучательная способность тела зависит от частоты излучения, температуры этого тела, его химического состава и состояния излучающей поверхности.

Излучательную способность тела можно представить не только как функцию частоты, но и как функцию длины волны:

$$r_{\lambda,T} = \frac{d\Phi_\lambda}{dS d\lambda}, \quad (2)$$

где $d\Phi_\lambda$ – поток электромагнитной энергии, излучаемый элементом поверхности тела площадью dS в узком интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$. В СИ $[r_{\lambda,T}] = \text{Вт}/\text{м}^2$.

Энергетическая светимость тела R (интегральная излучательная способность тела) – поток энергии электромагнитных волн всех частот, испускаемый единицей поверхности излучающего тела по всем направлениям:

$$R = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{dW}{dt dS}.$$

В СИ $[R] = \text{Вт}/\text{м}^2$.

Энергетическая светимость тела (интегральная излучательная способность) может быть представлена как:

$$R = \int_0^\infty r_{\nu,T} d\nu. \quad (3)$$

В общем случае падающее на тело излучение частично поглощается этим телом и частично отражается от него. *Поглощательная способность тела $a_{\nu,T}$* показывает, какая доля потока электромагнитной энергии $d\Phi_\nu^{\text{пад}}$, падающего на единицу площади поверхности тела в узком интервале частот от ν до $\nu + d\nu$, им поглощается:

$$a_{\nu,T} = \frac{d\Phi_{\nu}^{\text{погл}}}{d\Phi_{\nu}^{\text{пад}}},$$

где $d\Phi_{\nu}^{\text{погл}}$ – поглощаемый той же поверхностью тела поток энергии, приходящийся на тот же интервал частот.

Поглощательная способность любого реального тела $a_{\nu,T}$ зависит от частоты излучения, температуры этого тела, его химического состава, состояния поверхности.

Абсолютно черным телом называется тело, которое при любой температуре T полностью поглощает все падающее на него излучение. Его поглощательная способность $a_{\nu,T}^*$ для любой частоты ν равна единице:

$$a_{\nu,T}^* \equiv 1.$$

Серым называется тело, поглощательная способность которого меньше единицы и не зависит от частоты и температуры.

Абсолютно черных тел в природе не существует. Однако замкнутая полость с малым отверстием, температура стенок которой поддерживается постоянной, очень близка по своим свойствам к абсолютно черному телу.

Закон (теорема) Кирхгофа: отношение излучательной способности $r_{\nu,T}$ тела к его поглощательной способности $a_{\nu,T}$ не зависит от природы, геометрической формы и свойств тела, а является *одинаковой* для всех тел (т. е. *универсальной*) функцией частоты ν и температуры T :

$$\frac{r_{\nu,T}}{a_{\nu,T}} = f(\nu, T), \quad (4)$$

где $f(\nu, T)$ – универсальная функция Кирхгофа.

Закон Кирхгофа отражает тот факт, что в случае равновесного излучения, чем сильнее тело поглощает излучение какой-либо частоты, тем интенсивней оно испускает данное излучение.

Особый случай представляет собой изучение абсолютно черного тела. Поскольку его поглотительная способность $a_{\nu,T}^* \equiv 1$, то из (4) следует, что излучательная способность $r_{\nu,T}^*$ абсолютно черного тела и есть универсальная функция Кирхгофа $f(\nu, T)$:

$$r_{\nu,T}^* = f(\nu, T). \quad (5)$$

Связь между универсальными функциями Кирхгофа частоты $f(\nu, T)$ и длины волны $\varphi(\lambda, T)$ получим заменой переменной $\nu = \frac{c}{\lambda}$ (где c – скорость света в вакууме) в выражении (3) для энергетической светимости абсолютно черного тела с учетом (5)

$$\begin{aligned} R^* &= \int_0^\infty r_{\nu,T}^* d\nu = \int_0^\infty f(\nu, T) d\nu = \left| \begin{array}{l} \nu = \frac{c}{\lambda}, \quad d\nu = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda \\ \nu_1 = 0, \quad \lambda_1 = \infty \\ \nu_2 = \infty, \quad \lambda_2 = 0 \end{array} \right| = - \int_\infty^0 \frac{c}{\lambda^2} \cdot f\left(\frac{c}{\lambda}, T\right) d\lambda = \\ &= \int_0^\infty \frac{c}{\lambda^2} \cdot f\left(\frac{c}{\lambda}, T\right) d\lambda = \int_0^\infty \varphi(\lambda, T) d\lambda, \end{aligned}$$

откуда:

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{c}{\lambda^2} \cdot f\left(\frac{c}{\lambda}, T\right). \quad (6)$$

Излучательные способности $r_{\nu,T}$ и $r_{\lambda,T}$ связаны друг с другом выражением, аналогичным (6):

$$r_{\lambda,T} = \frac{c}{\lambda^2} \cdot r_{c/\lambda,T}.$$

Нахождение вида функции $f(\nu, T)$ (или $\varphi(\lambda, T)$) является основной задачей теории теплового излучения.

При данной температуре излучательная способность ($r_{\nu,T}^*$ или $r_{\lambda,T}^*$) абсолютно черного тела максимальна по сравнению с другими телами. Измеряя ее, можно экспериментально определить вид функции $f(\nu, T)$ или $\varphi(\lambda, T)$.

Результаты таких опытов приведены на рис. 1. Разные кривые $\varphi(\lambda, T)$ соответствуют различным фиксированным температурам. Все кривые обнаруживают характерное поведение: при малых длинах волн функция $\varphi(\lambda, T)$ увеличивается с ростом λ , затем проходит через максимум и после этого стремится к нулю. Положение максимума сдвигается в сторону коротких длин волн по мере повышения температуры T .

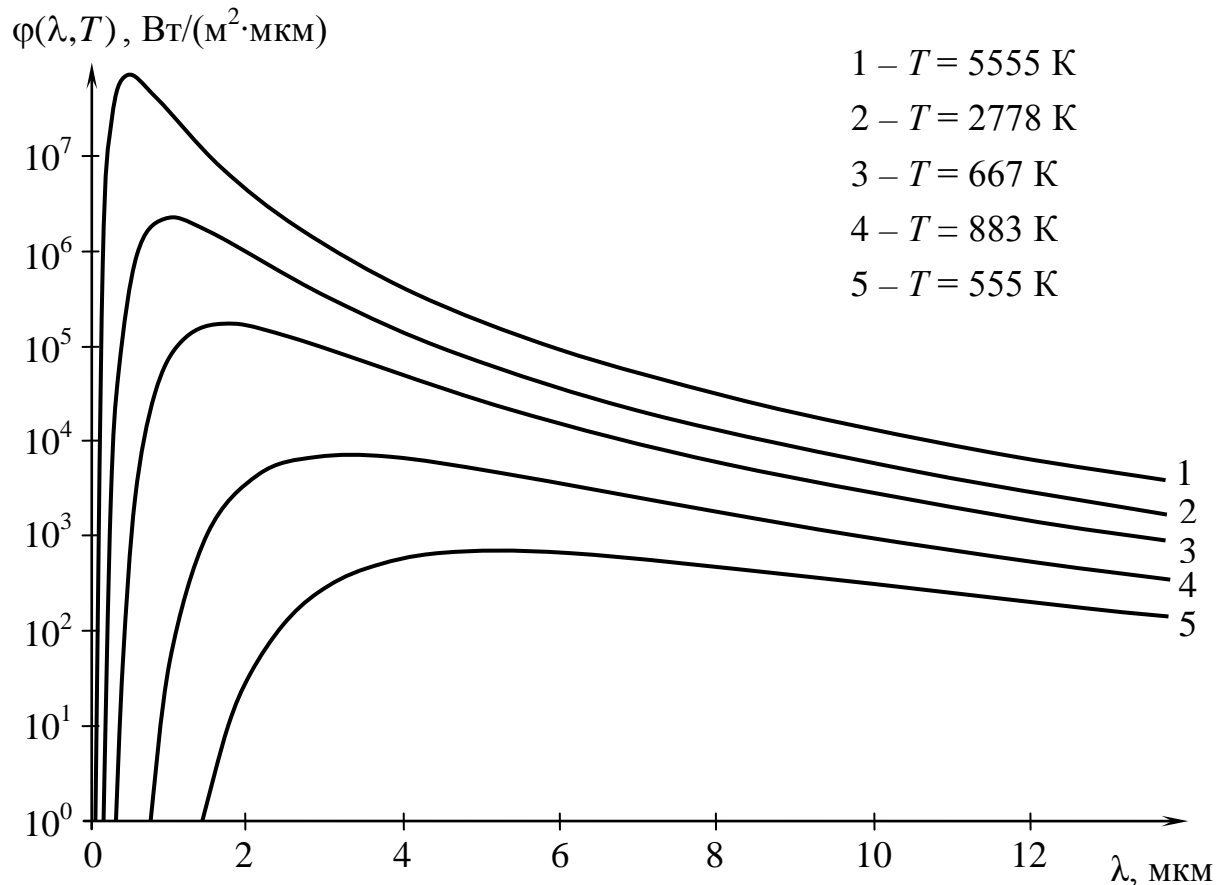


Рис. 1

Все попытки найти вид функции $f(\nu, T)$ ($\varphi(\lambda, T)$), полностью описывающий экспериментальные кривые во всем диапазоне частот (длин волн), на основе классических представлений потерпели неудачу.

В 1900 г. Макс Планк теоретически получил вид функции $f(\nu, T)$ ($\varphi(\lambda, T)$), хорошо согласующийся с экспериментальными данными. Для этого ему пришлось ввести гипотезу, коренным образом противоречащую классическим представлениям, а именно допустить, что электромагнитное излучение

испускается не непрерывно, а в виде отдельных порций энергии (квантов), величина которых пропорциональна частоте ν излучения:

$$\varepsilon_0 = h\nu ,$$

где коэффициент $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с впоследствии получил название постоянной Планка.

Закон излучения (формула) Планка:

$$f(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/(kT)} - 1}, \text{ или}$$

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/(kT\lambda)} - 1}, \quad (7)$$

где $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Из формулы Планка (7) следуют закон излучения Вина, формула Рэлея – Джинса, закон Стефана – Больцмана и закон смещения Вина, полученные ранее на основе классических представлений термодинамики и электромагнитной теории света.

Закон Стефана – Больцмана (1879 г. и 1884 г.): энергетическая светимость R^* абсолютно черного тела прямо пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры T :

$$R^* = \sigma T^4, \quad (8)$$

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

Закон смещения Вина (1893 г.): при повышении температуры T абсолютно черного тела максимум его излучательной способности (спектральной плотности излучения) смещается в сторону коротких длин волн так, что выполняется соотношение

$$\lambda_m \cdot T = b = \text{const}, \quad (9)$$

где λ_m – длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности; $b = 2,898 \cdot 10^{-3}$ м·К – постоянная Вина.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка изображена на рис. 2. Она состоит из источника теплового излучения 1 (нихромовой спирали в форме цилиндра диаметром 2,5 мм и высотой 3 мм); механического модулятора светового потока, состоящего из обтюратора 2 и электродвигателя 3; набора оптических инфракрасных узко-

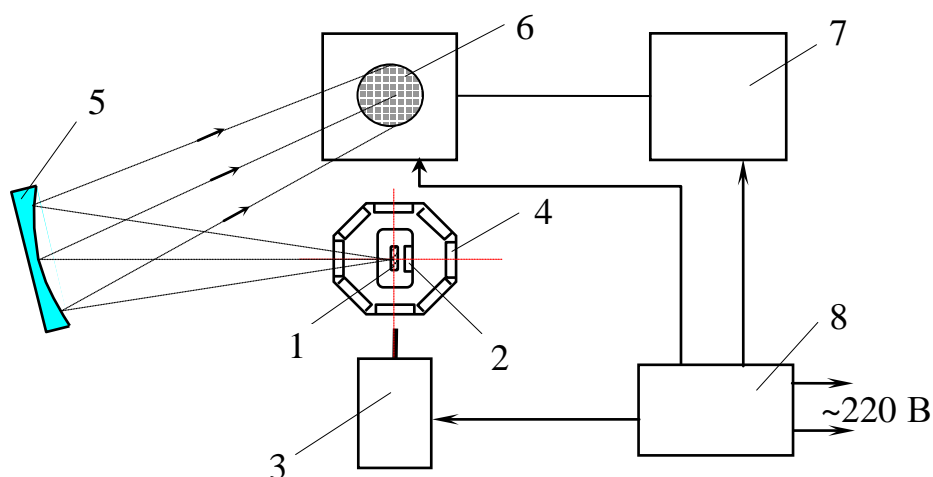


Рис. 2

полосных фильтров 4; сферического зеркала 5; пирозэлектрического приемника излучения 6; электронного блока обработки сигнала фотоприемника 7 с цифровым вольтметром и блока питания 8.

Конструктивно установка выполнена в виде прибора, состоящего из оптико-механического блока, расположенного в левой части под прозрачной крышкой, и электронного блока в правой части. Смена оптических фильтров осуществляется поворотом блока фильтров на фиксированный угол с помощью рукоятки, расположенной над крышкой. Поворот следует производить только по часовой стрелке плавно до щелчка, означающего фиксацию положения фильтра. При этом номер установленного в рабочее положение фильтра указывается в прямоугольном окне на верхней поверхности прозрачной крышки. В установке применяются семь инфракрасных узкополосных фильтров (окна 1–7) и нейтральный ослабитель (окно 8), пропускающий волны в диапазоне $2 \div 20$ мкм. В табл. 1 приведено соответствие между номером окна, при котором один из фильтров на-

ходится в рабочем положении, и длиной λ электромагнитных волн, пропускаемых этим фильтром.

Таблица 1

№ (окна)	1	2	3	4	5	6	7	8
λ , мкм	2,08	2,50	3,20	3,90	4,54	6,20	8,50	$2 \div 20$

Нагревание нихромовой спирали осуществляется с помощью пропускаемого через нее электрического тока. Нажатием одной из кнопок «Т1», «Т2» или «Т3» нихромовая спираль подключается к источнику тока, при этом «загорается» один из светодиодов. (ВНИМАНИЕ. Не допускается одновременное нажатие любых двух кнопок из «Т1», «Т2», «Т3» и «Излучатель»).

В нажатом положении кнопки «Модулятор» подается напряжение на электродвигатель, а вращение обтюратора осуществляет модуляцию теплового излучения для эффективной обработки полезного сигнала. В нажатом положении кнопки «Диапазон» значение цифрового индикатора вольтметра следует увеличить в три раза.

Тепловое излучение нагретой нихромовой спирали (находящейся при постоянной температуре $T = \text{const}$) модулируется, проходит через один из оптических фильтров и, отражаясь от сферического зеркала, попадает на фотоприемник, чувствительность которого практически одинакова в диапазоне длин волн $2 \div 20$ мкм.

Величина напряжения U сигнала на выходе фотоприемника прямо пропорциональна падающему на него потоку излучения, который, в свою очередь, прямо пропорционален потоку электромагнитной энергии, излучаемому нагретой нихромовой спиралью. Оптический узкополосный фильтр позволяет выделить из потока излучения нихромовой спирали часть потока $d\Phi_\lambda$, приходящуюся на узкий спектральный интервал длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$. При этом измеренное значение напряжения $U \sim d\Phi_\lambda$. Поскольку ширина $d\lambda$ спектра пропускания фильтра мала, то согласно (2) величина излучательной способно-

сти $r_{\lambda,T}$ нихромовой спирали при данной длине волны λ и фиксированной температуре T прямо пропорциональна $d\Phi_{\lambda}$. Таким образом, значение напряжения U , измеренное при рабочем положении одного из узкополосных фильтров, прямо пропорционально величине излучательной способности $r_{\lambda,T}$ нихромовой спирали для данной длины волны λ , т. е. $U \sim r_{\lambda,T}$.

Поскольку поглощательная способность нихромовой спирали практически не зависит от длины волны, то ее можно считать серым телом. Поэтому для данной длины волны λ и температуры T значение функции $\varphi(\lambda, T)$ прямо пропорционально излучательной способности $r_{\lambda,T}$, а, значит, и величине напряжения $U(\lambda, T)$ при этих же значениях λ и T :

$$\varphi(\lambda, T) = \varkappa \cdot U(\lambda, T),$$

где постоянная $\varkappa = 1,67 \cdot 10^4$ Вт/(В·м²·мкм) для данной лабораторной установки.

Применив набор узкополосных фильтров с различными λ (окна 1–7) по результатам измерений напряжения можно построить кривую $U(\lambda, T)$ при фиксированной температуре $T = \text{const}$, вид которой будет практически соответствовать спектральной кривой излучательной способности $r_{\lambda,T}$ нихромовой спирали, а также кривой $\varphi(\lambda, T)$, описываемой формулой Планка (7), при той же температуре.

Значение напряжения U_{R^*} сигнала на выходе фотоприемника при установке в рабочее положение нейтрального ослабителя (окно 8) прямо пропорционально энергетической светимости R^* нихромовой спирали в интервале длин волн от 2 до 20 мкм.

Построив кривые $U(\lambda, T)$ для различных фиксированных температур, можно осуществить проверку выполнения законов смещения Вина и Стефана – Больцмана следующим образом.

Из экспериментально полученных кривых $U(\lambda, T)$ определяются длины волн λ_m , для которых величина U (а, значит, и значение функции $\varphi(\lambda, T)$) мак-

симальна. Используя закон смещения Вина (9), вычисляются экспериментально полученные температуры излучателя по формуле

$$T_{\text{эксп}} = \frac{b}{\lambda_m} \quad (10)$$

и полученные значения сравниваются с приведенными T_1, T_2, T_3 в задании №2.

Проверку закона Стефана – Больцмана (8) можно осуществить двумя способами.

1 способ. С помощью экспериментально полученной кривой $U(\lambda, T)$ при температуре T_1 определить площадь S_1 фигуры, ограниченной этой кривой и осью абсцисс. Для этого данную фигуру надо разбить на n криволинейных трапеций таким образом, чтобы каждую из них можно было с достаточно большой точностью считать прямоугольной трапецией (рис. 4). Тогда площадь S_i каждой из них определяется по формуле

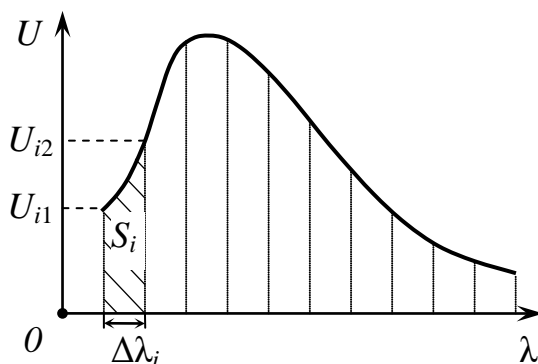


Рис. 4

$$S_i = \frac{U_{i1} + U_{i2}}{2} \cdot \Delta\lambda_i,$$

где U_{i1} и U_{i2} — длины оснований i -й прямоугольной трапеции, $\Delta\lambda_i$ — ее высота (см. рис. 4). Затем площадь S_1 фигуры вычисляется как

$$S_1 = \sum_{i=1}^n S_i.$$

Аналогично определить площади S_2 и S_3 криволинейных трапеций, образованных экспериментально полученными кривыми $U(\lambda, T)$ при температурах T_2 и T_3 , вычислить отношения

$$\frac{S_1}{(T_{\text{эксп1}})^4}, \quad \frac{S_2}{(T_{\text{эксп1}})^4}, \quad \frac{S_3}{(T_{\text{эксп1}})^4} \quad (11)$$

и сравнить их. Так как площадь S фигуры, ограниченной кривой $U(\lambda, T)$ и осью абсцисс, прямо пропорциональна энергетической светимости R^* нихромовой спирали в интервале длин волн от 2 до 20 мкм при данной температуре T , то со-

гласно закону Стефана – Больцмана значения отношений (11) должны быть равными между собой.

2 способ. Экспериментально измерить величину напряжения U_{R^*} (положение 8 окна блока фильтров), прямо пропорциональную энергетической светимости R^* нихромовой спирали в интервале длин волн от 2 до 20 мкм, для трех температур, вычислить отношения

$$\frac{U_{R^*1}}{(T_{\text{эксп1}})^4}, \frac{U_{R^*2}}{(T_{\text{эксп2}})^4}, \frac{U_{R^*3}}{(T_{\text{эксп3}})^4} \quad (12)$$

и сравнить их. Согласно закону Стефана – Больцмана значения отношений (12) должны быть равными между собой.

Порядок выполнения работы

ВНИМАНИЕ! Перед включением установки, убедитесь, что все кнопки находятся в отжатом положении. Затем нажмите кнопку «Сеть», а после загорания светодиода – кнопку «Т1». Выждите 15 минут, что необходимо для прогрева установки, после чего приступите к выполнению измерений.

Задание 1. Построение кривых излучательной способности при различных фиксированных температурах

1. Поворотом рукоятки установить в рабочее положение фильтр 1.
2. Включить двигатель модулятора, нажав кнопку «Модулятор» (до окончания измерений не выключать).
3. Выждать 10–15 с, пока показания цифрового индикатора вольтметра установятся, и снять показания. Если на индикаторе высвечивается информация 1 (после запятой цифра не светится), то следует нажать кнопку «Диапазон» (при этом показания индикатора вольтметра следует увеличить в три раза.).
4. Последовательно осуществляя смену фильтров, снять показания и заполнить табл. 2. Провести не менее трех измерений для каждого фильтра.

Таблица 2

№ фильтра (окна)	1	2	3	4	5	6	7	8
λ , мкм	2,08	2,50	3,20	3,90	4,54	6,20	8,50	U_{R^*}
U , В при $T_1 = \text{const}$								
среднее								

При величине показаний цифрового вольтметра меньше 2 В лучше работать на диапазоне 1. В положении 8 блока фильтров вместо узкополосного фильтра устанавливается нейтральный ослабитель, что позволяет измерить величину U_{R^*} , прямо пропорциональную энергетической светимости R^* в интервале длин волн от 2 до 20 мкм.

5. Повторить измерения для температуры T_2 , нажав кнопку «Т2» (при этом светодиод против кнопки «Т1» должен погаснуть), а затем для температуры T_3 . Результаты измерений занести в таблицы 3 и 4, аналогичные табл. 2. После перехода к новой температуре до начала проведения измерений надо выждать 5 мин.

6. Нажатием кнопки «Модулятор» отключить двигатель и излучатель от блока питания. Выключить установку нажатием кнопки «Сеть».

7. На миллиметровой бумаге формата А4 построить графики зависимостей $U(\lambda, T_1)$, $U(\lambda, T_2)$ и $U(\lambda, T_3)$ для трех температур, выбрав масштаб по оси длин волн 40 мм – 1 мкм, а по оси напряжений 100 мм – 1 В. Убедиться в их соответствии с теоретическими положениями.

Задание 2. Проверка справедливости закона смещения Вина

1. По графикам $U(\lambda, T_1)$, $U(\lambda, T_2)$ и $U(\lambda, T_3)$ определить величины λ_{m1} , λ_{m2} и λ_{m3} и внести их в табл. 5.

Таблица 5

i	T_i, K	$\lambda_{m i}$	$T_{\text{эксп } i}$	$\eta_i, \%$
1	900			
2	740			
3	630			

2. По формулам (9) вычислить значения $T_{\text{эксп}1}$, $T_{\text{эксп}2}$ и $T_{\text{эксп}3}$.

3. Вычислить относительные отклонения экспериментальных данных от заданных величин температур в процентах

$$\eta_i = \frac{|T_i - T_{\text{эксп } i}|}{T_i} \cdot 100\% .$$

Задание 3. Проверка справедливости закона Стефана – Больцмана

1 способ

1. В табл. 6 внести значения $T_{\text{эксп}1}$, $T_{\text{эксп}2}$ и $T_{\text{эксп}3}$ из табл. 5.

Таблица 6

i	$T_{\text{эксп } i}$	S_i	$S_i / T_{\text{эксп } i}^4$	$\langle S / T_{\text{эксп}}^4 \rangle$	$\eta_i, \%$
1					
2					
3					

2. Определить площади S_1 , S_2 и S_3 фигур, ограниченных осью абсцисс и кривыми $U(\lambda, T_1)$, $U(\lambda, T_2)$ и $U(\lambda, T_3)$ для трех температур соответственно. Полученные значения внести в табл. 6.

3. Вычислить отношения (11) и их среднее значение $\langle S/T_{\text{эксп}}^4 \rangle$.

4. Вычислить величины относительных отклонений отношений (3.2.11) от их среднего значения в процентах

$$\eta_i = \frac{|(S/T_{\text{эксп}}^4)_{\text{ср}} - S_i/T_{\text{эксп } i}^4|}{(S/T_{\text{эксп}}^4)_{\text{ср}}} \cdot 100\%.$$

2 способ

1. В табл. 7 внести значения $T_{\text{эксп}1}$, $T_{\text{эксп}2}$ и $T_{\text{эксп}3}$ из табл. 5 и значения U_{R^*1} , U_{R^*2} и U_{R^*3} из табл. 2–4.

Таблица 7

i	$T_{\text{эксп } i}$	U_{R^*i}	$U_{R^*i}/T_{\text{эксп } i}^4$	$\langle U_{R^*}/T_{\text{эксп}}^4 \rangle$	$\eta_i, \%$
1					
2					
3					

2. Вычислить отношения (12) и их среднее значение $\langle U_{R^*}/T_{\text{эксп}}^4 \rangle$.

3. Вычислить величины относительных отклонений отношений (12) от их среднего значения в процентах

$$\eta_i = \frac{|\langle U_{R^*}/T_{\text{эксп}}^4 \rangle - U_{R^*i}/T_{\text{эксп } i}^4|}{\langle U_{R^*}/T_{\text{эксп}}^4 \rangle} \cdot 100\%.$$

Сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Какова природа теплового излучения?
2. Дать определение спектральной плотности излучения.
3. Дать определение энергетической светимости тела.

4. Сформулировать теорему Кирхгофа.
5. Записать формулу Планка для равновесного теплового излучения.
6. Сформулировать закон Стефана – Больцмана.
7. Сформулировать закон смещения Вина.

Литература

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 5 кн. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И. В. Савельев. – М. : Астрель, АСТ, 2003.
2. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : в 5 т. Т. 4. Оптика / Д. В. Сивухин. – М. : Физматлит, МФТИ, 2005.