

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: исследование зависимости теплового излучения абсолютно черного тела от температуры; проверка закона Стефана-Больцмана.

Приборы и принадлежности: электропечь (ЭП), пирометр - термостолбик (ТС), блок управления и индикации (БУИ).

Объект измерений: модель абсолютно черного тела.

Средства измерений: термостолбик (ТС).

Теоретическая часть

Электромагнитное излучение, испускаемое нагретым телом, находящимся в состоянии термодинамического равновесия, называется *тепловым излучением*. При тепловом излучении внутренняя энергия тела, обусловленная хаотическим движением частиц тела, непрерывно переходит в энергию испускаемых ими электромагнитных волн. Примеры тепловых излучений можно увидеть на рис. 1.

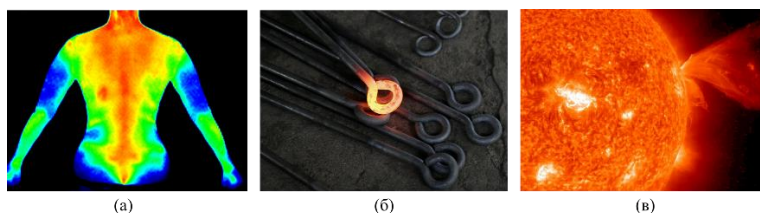


Рис. 1. Тепловое излучение: а - человека (инфракрасный диапазон), б - нагретого металла (видимый диапазон), в – звезды.

Энергия излучения распределяется неравномерно между всеми длинами волн, которые испускают нагретыми телами. Энергия, излучаемая в единицу времени единицей поверхности

тела в единичном интервале длин волн, называется *спектральная плотность излучения* (спектральная испускательная способность).

$$r_{\lambda,T} = \frac{dW}{S dt d\lambda}, \quad (1)$$

При падении на поверхность какого-либо тела лучистого потока наблюдается поглощение энергии. Величина, равная отношению энергии поглощенного света к энергии падающего, называется *коэффициентом поглощения* (спектральная поглощательная способность).

$$\alpha_{\lambda,T} = \frac{E_{\lambda \text{ погл.}}}{E_{\lambda \text{ пад.}}}. \quad (2)$$

По закону Кирхгофа отношение спектральной плотности излучения $r_{\lambda,T}$ к коэффициенту поглощения $\alpha_{\lambda,T}$ не зависит от природы тела и является для каждой длины волны только функцией температуры:

$$\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = f(\lambda, T). \quad (3)$$

Если спектральная поглощательная способность тела в некоторой области длин волн постоянна $\alpha_{\lambda,T} < 1$, то тело в этой области спектра называется *серым*.

Абсолютно чёрным телом (а.ч.т.) называют тело, поглощающее всё падающее на него излучение любой длины волны при любой температуре. Коэффициент поглощения а.ч.т. для всех длин волн при любых температурах:

$$\alpha_{\lambda,T}^{\text{а.ч.т.}} = 1. \quad (4)$$

На основании закона Кирхгофа (3) и (4):

$$r_{\lambda,T}^{\text{а.ч.т.}} = f(\lambda, T), \quad (5)$$

то есть функция $f(\lambda, T)$ определяется спектральной плотностью излучения абсолютно чёрного тела $r_{\lambda,T}^{\text{а.ч.т.}}$.

Тогда спектральная плотность излучения может быть получена через спектральную плотность излучения а.ч.т. (3):

$$r_{\lambda,T} = \alpha_{\lambda,T} r_{\lambda,T}^{\text{а.ч.т.}}. \quad (6)$$

В 1900 г. Планк показал, что выражение для $r_{\lambda,T}^{\text{а.ч.т.}}$ можно получить, предположив, что излучение испускается не непрерывно, а в виде отдельных порций (квантов). Таким образом, характер излучения и поглощения энергии атомами и молекулами квантовый. Тогда выражение для спектральной плотности излучения абсолютно чёрного тела будет выглядеть следующим образом:

$$r_{\lambda,T}^{\text{а.ч.т.}} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{2kT}} - 1}. \quad (7)$$

Формула Планка позволяет получить выражение полной интегральной (для всех длин волн) энергии, излучаемой единицей поверхности абсолютно чёрного тела в единицу времени, называемой *энергетической светимостью* R_Σ (излучательностью):

$$R_{\lambda,T}^{\text{а.ч.т.}} = \frac{dW}{Sdt} = \int_0^\infty r_{\lambda,T}^{\text{а.ч.т.}} d\lambda. \quad (8)$$

Интегрирование по всем длинам волн функции $r_{\lambda,T}^{\text{а.ч.т.}}$ (8) – даёт зависимость энергетической светимости а.ч.т. от температуры (закон Стефана- Больцмана):

$$R_{\lambda,T}^{\text{а.ч.т.}} = \sigma T^4, \\ \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2}, \quad (9)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана, численно равная мощности излучения, испускаемого с единицы площади абсолютно черного тела при единичной температуре во всем диапазоне длин волн.

В природе не существует тел, совпадающих по свойствам с абсолютно чёрным. Тела, покрытые сажей или платиновой чернью, приближаются по своим свойствам к абсолютно чёрным в ограниченном интервале длин волн. Реальные тела, называемые чёрными, поглощают хорошо только излучения видимой области спектра.

Модель абсолютно чёрного тела можно представить в виде

небольшого отверстия, проделанного в полном зачернённом изнутри теле (рис. 2). Если размер отверстия мал по сравнению с размером полости, то излучение, входящее через это отверстие внутрь полости, полностью поглощается и не выходит обратно, т.е. $a_{\lambda,T} = 1$.

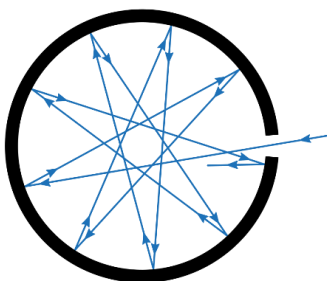


Рис. 2. Модель абсолютно черного тела.

Методика проведения измерений и описание установки

Общая схема установки приведена на рис. 3. Установка содержит:

- 1 – электропечь (ЭП);
- 2 – пирометр (приемник излучения включает в себя приборы 3 и 4);
- 3 – термостолбик (ТС);
- 4 – блок управления и индикации (БУИ).

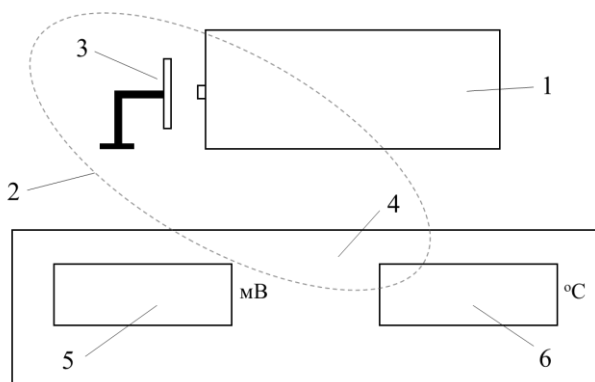


Рис. 3. Общая схема установки.

На передней панели блока управления и индикации размещены цифровые индикаторы:

5 – напряжения на термостолбике (в мВ);

6 – температуры печи (в °С).

Электропечь состоит из нагревательного элемента, термопары, регулятора нагрева и вентилятора. Отверстие в камере печи – 7, через которое выводится излучение абсолютно чёрного тела, находится на передней панели электропечи (рис. 4). Там же на передней панели имеются кнопки:

8 – «Сеть» для включения печи;

9 – «Вент» для включения вентилятора;

10 – красная лампочка (загорание информирует о включении вентилятора).

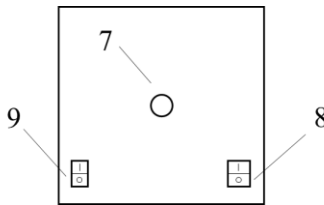


Рис. 4. Схема передней панели электропечи.

Термостолбик представляет собой несколько последовательно соединённых термопар. Напряжение U , вырабатываемое термопарами, пропорционально падающей на входное отверстие термостолбика мощности излучения, которая пропорциональна энергетической светимости выходного отверстия электропечи $R_{\Sigma}^{\text{а.ч.т.}}$, т. е.

$$R_{\Sigma}^{\text{а.ч.т.}} = \alpha U. \quad (10)$$

Таким образом, сняв зависимость напряжения на термостолбике от температуры печи $U(T)$ можно исследовать зависимость энергетической светимости абсолютно чёрного тела от температуры $R_{\Sigma}^{\text{а.ч.т.}}(T)$ и проверить закон Стефана-Больцмана.

Ниже приведены фотографии установки (рис. 5-8).

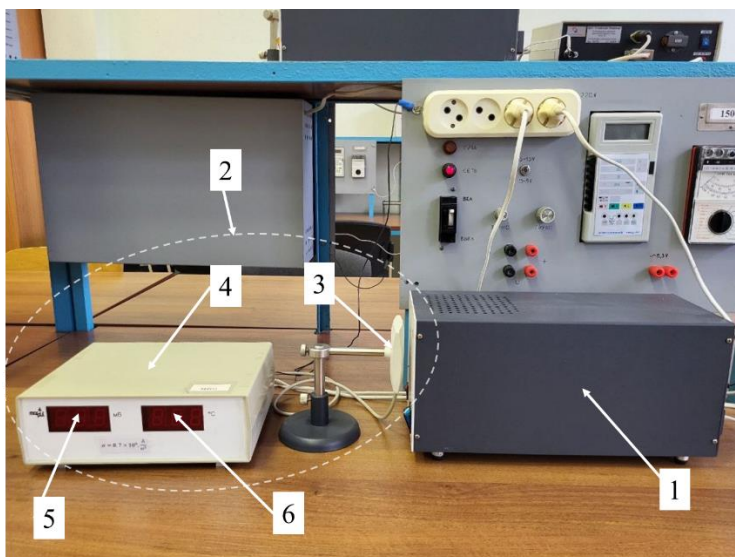


Рис. 5. Лабораторная установка.

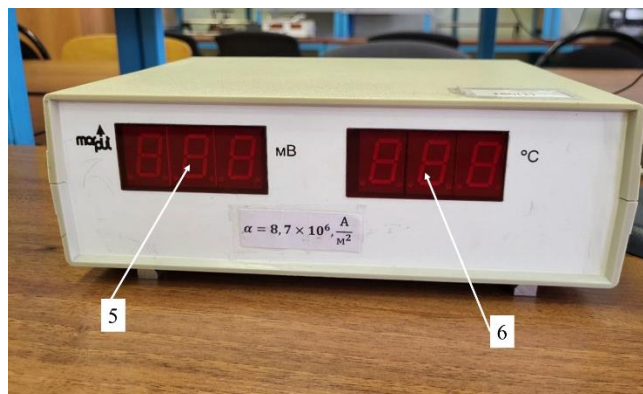


Рис. 6. Блок управления и индикации.



Рис. 7. Термостолбик.

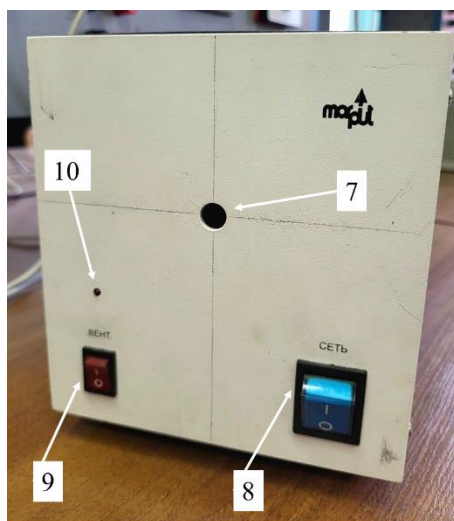


Рис. 8. Передняя панель электропечи.

Порядок выполнения

а) проведение измерений лаборатории

1. Кнопки «Сеть» и «Вент» на передней панели электропечи должны быть выключены!

Установить термостолбик – 3 вплотную к передней панели электропечи – 1 так, чтобы его входное отверстие находилось точно напротив выходного отверстия печи – 7.

2. Подключить блок управления и индикации – 4 и электрическую печь – 1 к питающей сети (рис. 9).



Рис. 9. Подключение к сети электропечи и блока управления и индикации.

3. Включить кнопку «Сеть» – 11 на задней панели блока управления и индикации – 4 (рис. 10) при этом должны загореться цифровые индикаторы – 5, 6. Дать установке прогреться около 3 минут. Приготовиться к записи результатов последующих измерений.

. Включить электропечь – 1 кнопкой «Сеть» – 8 на передней панели печи (рис. 8), при этом вентилятор (выключатель «Вент» – 9) должен оставаться в выключенном состоянии.

5. По данным индикатора температуры печи – 6, начиная с $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температуры $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$ с интервалом в $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ снимать показания напряжения U на термостолбике в мВ – 5 и полученные данные записать в таблицу 1 (рис. 6).

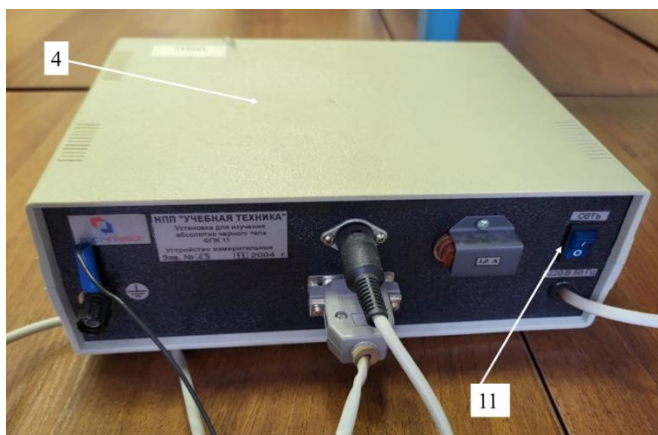


Рис. 10. Задняя панель блока управления и индикации.

Недопустимо повышать температуру печи более +750 °С!

6. Выключить нагреватель печи кнопкой «Сеть» – 8 и включить вентилятор печи кнопкой «Вент» – 9 на передней панели электропечи (рис. 8), при этом должна загореться красная лампочка – 10.

7. По данным индикатора температуры печи – 6, начиная с +700 °С до температуры +300 °С, снимать показания напряжения на термостолбике в мВ – 5 и полученные данные записать в таблицу 1.

8. После спада показаний индикатора до температуры +300 °С выключить вентилятор печи кнопкой «Вент» – 9 и выключить кнопку «Сеть» – 11 на задней панели блока управления и индикации (БУИ).

9. Запишите значение коэффициент пропорциональности α между энергетической светимостью абсолютно чёрного тела $R_{\Sigma}^{a.ч.т.}$ и напряжением на термостолбике U , которое указано на установке. Результат занесите в таблицу 1.

Таблица 1

№	Показания индикатора температуры t (°C)	Напряжение на термостолбике U (мВ)		Температура излучателя $T = t + 273 + \Delta T$ (К)	T^4 (10^{11} K^4)
		при $\uparrow t$	при $\downarrow t$		
1	300				
2	350				
3	400				
4	450				
5	500				
6	550				
7	600				
8	650				
9	700				
$\alpha =$					

б) обработка результатов измерений

1. Вычислите температуру излучателя в кельвинах по формуле (11), добавив при этом поправку в $\Delta T = 23 \text{ К}$, т. к. индикатор температуры показывает разность температур самой печи и её корпуса (комнатной температуры $t_{\text{ком}} \approx +23 \text{ }^\circ\text{C}$). Результаты занести в таблицу 1.

$$T = t + 273 + \Delta T. \quad (11)$$

2. Рассчитайте T^4 . Данные занести в таблицу 1.

3. Постройте графики зависимости U от T^4 при подъёме и при спаде температуры.

Данные зависимости должна быть линейными вида $U = kT^4$. Недопустимо рисовать ломанную кривую, точно проходящую через экспериментальные точки: следует провести такую прямую линию, чтобы отклонение экспериментальных точек от нее в разные стороны приблизительно компенсировали друг друга (рис. 11).

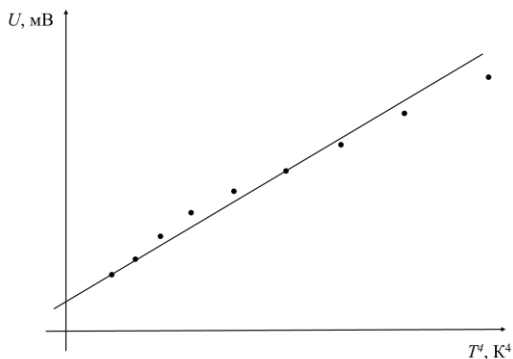


Рис. 11. Пример построения прямой по экспериментальным точкам.

4. Определите коэффициенты наклона каждой прямой и занесите в таблицу 2. Для этого на экспериментальной прямой выберите две точки A и B , расположенные достаточно далеко друг от друга, и определите их координаты $(x_A; y_A)$ и $(x_B; y_B)$ (рис. 12). Тогда коэффициент наклона можно найти по формуле (12).

$$k = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{\Delta U}{\Delta(T^4)}, \quad \left[\frac{\text{В}}{\text{К}^4} \right]. \quad (12)$$

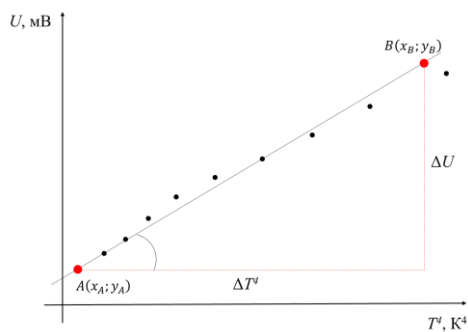


Рис. 12. Пример определения коэффициента наклона экспериментальной прямой.

Таблица 2

k_1		k_2	
b_1	b_2	b_1	b_2
Δk_1		Δk_2	
σ_1		σ_2	
σ_{cp}			
$\delta k_1 = \delta \sigma_1$		$\delta k_2 = \delta \sigma_2$	
$\Delta \sigma_1$		$\Delta \sigma_2$	
$\Delta \sigma$			

5. Оцените погрешность коэффициентов наклона экспериментальных прямых Δk_1 и Δk_2 и запишите результат в таблицу 2. Для этого проведите из точки пересечения экспериментальной прямой и оси ординат две прямые так, чтобы большая часть экспериментальных точек оказалась между ними (рис. 13). Определив углы наклона новых прямых b_1 и b_2 , можно приблизительно оценить абсолютную погрешность величины k по формуле (13).

$$\Delta k = \frac{b_2 - b_1}{\sqrt{n}}, \quad (13)$$

где n – общее число экспериментальных точек.

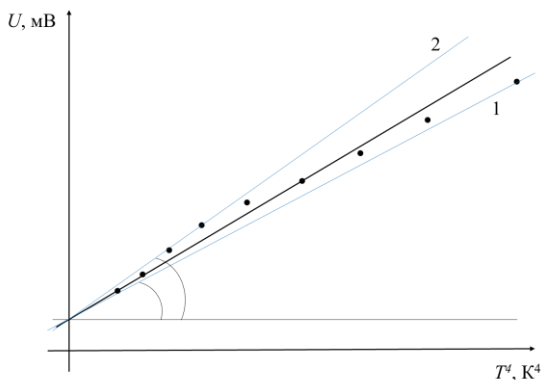


Рис. 13. Пример определения абсолютной погрешности коэффициента наклона по графику.

6. По коэффициентам наклона прямых k рассчитайте для обоих случаев постоянную Стефана – Больцмана σ по формуле (14).

$$\sigma = \frac{\Delta R_{\text{э}}^{\text{а.ч.т.}}}{\Delta(T^4)} = \alpha \frac{\Delta U}{\Delta(T^4)} = \alpha k, \quad (14)$$

где α - коэффициент пропорциональности между энергетической светимостью абсолютно чёрного тела $R_{\text{э}}^{\text{а.ч.т.}}$ и напряжением на термостолбике U .

$$R_{\text{э}}^{\text{а.ч.т.}} = \alpha U. \quad (15)$$

Значение α указано на установке. Для лаборатории 14202 $\alpha = 8,7 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$. Результат занесите в таблицу 2.

7. Рассчитайте среднее значение постоянной Стефана-Больцмана по формуле (16) и запишите в таблицу 2.

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}. \quad (16)$$

8. Определите относительную погрешность постоянных Стефана-Больцмана для каждой прямой $\delta\sigma_1$ и $\delta\sigma_2$, которые будут равны соответственно относительным погрешностям коэффициентов наклона каждой прямой δk_1 и δk_2 .

$$\delta\sigma = \delta k = \frac{\Delta k}{k}. \quad (17)$$

9. Определите абсолютную погрешность постоянных Стефана-Больцмана для каждой прямой $\Delta\sigma_1$ и $\Delta\sigma_2$ по формуле (18) и запишите в таблицу 2.

$$\Delta\sigma = \delta\sigma \cdot \sigma. \quad (18)$$

10. Определите абсолютную ошибку измерений $\Delta\sigma$ по формуле (19) и запишите в таблицу 2.

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2}{2}. \quad (19)$$

11. Запишите окончательный результат измерений в виде:

$$\sigma = \sigma_{\text{ср}} + \Delta\sigma. \quad (20)$$

Не забудьте округлить результат.

12. Сравните полученное значение σ с учётом ошибки измерений с табличным значением постоянной Стефана – Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Контрольные вопросы

1. Что называется тепловым излучением?
2. Каков механизм возникновения теплового излучения?
3. От чего зависит равновесное тепловое излучение?
4. Что называется спектральной поглощательной способностью и спектральной испускательной способностью?
5. Что называется абсолютно черным телом? Как оно реализуется на практике?
6. Запишите закон Кирхгофа. Распространяется ли данный закон на другие виды излучения?
7. Запишите закон Стефана-Больцмана. Почему он не выполняется для реальных тел?
8. Какие гипотезы использовал Планк при выводе формулы для спектральной плотности излучения абсолютно черного тела?
9. Какая константа рассчитывается по результатам измерений?

10. В чем физический смысл постоянной Стефана-Больцмана?
11. На сколько процентов следует увеличить температуру а.ч.т., чтобы излучаемая им энергия возросла в 16 раз?
12. В чем заключается принцип измерения температуры тела с помощью пирометра (термостолбика)?

Рекомендуемая литература

В качестве литературы для изучения теплового излучения рекомендуется: [1, §49-51, 53; 2, §10.1-10.3; 3, §197-200]. Там же можно найти ответы на некоторые контрольные вопросы.

1. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 3 т. Том 3. Оптика. Атомная физика. Физика атомного ядра и элементарных частиц.: учебное пособие для вузов / И. В. Савельев. — 16-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 537 с.
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики (в трех томах). т. III: Волновые процессы. Оптика. Атомная и ядерная физика. — М.: Высшая школа, 1979. — 511 с.
3. Трофимова, Т.И. Курс физики: Учеб. для вузов / Т.И. Трофимова. — 11-е изд., стер. — М.: Высшая шк., 2006. — 560 с.