

Лабораторная работа 5.8.1.

Вязовцев Андрей, Б01-009

09.10.22

Цель работы: при помощи модели абсолютно чёрного тела (АЧТ) проводятся измерения температуры, исследуется излучение накали́нных тел, определяются постоянные Планка и Стефана-Больцмана.

В работе используются: оптический пирометр с исчезающей нитью и термопарой, накали́нные тела с различной испускательной способностью.

Теоретическая справка:

Для измерения температуры тел, удалённых от наблюдателя, применяют методы оптических пирометрии, основанные на использовании зависимости испускательной способности исследуемого тела от температуры. Различают три температуры, функционально связанные с истинной термодинамической температурой и излучательной способностью тела: радиационную $T_{\text{рад}}$, цветовую $T_{\text{цв}}$ и яркостную $T_{\text{ярк}}$.

Радиационная (энергетическая) температура — температура АЧТ, при которой его интегральная испускательная способность одинакова с интегральной испускательной способностью исследуемого тела.

Цветовая температура — температура АЧТ, при которой отношение их спектральных испускательных способностей для двух заданных длин волн одинаково.

Яркостная температура — температура АЧТ, при которой его спектральная испускательная способность равна спектральной испускательной способности исследуемого тела при той же длине волны. Именно эту температуру мы и будем измерять. Для вольфрама функциональная зависимость термодинамической температуры от яркостной представлена на рис. 1.

Закон Киргофа для излучения любого тела:

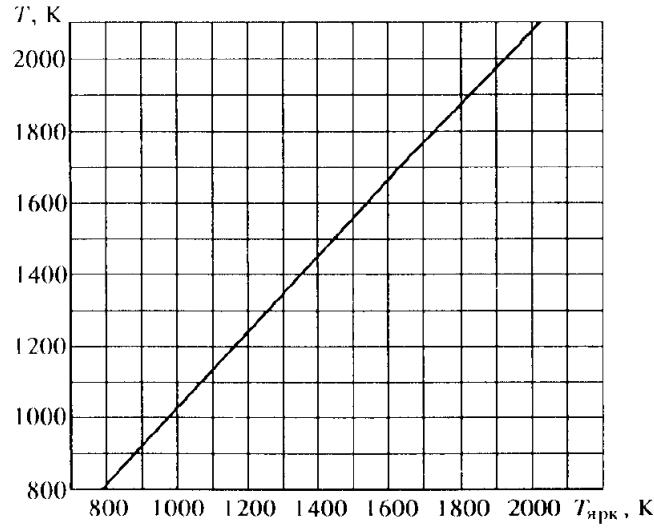


Рис. 1. $T = f(T_{\text{ярк}})$ для вольфрама

$$r_{\lambda} = a_{\lambda} r_{\lambda}^{\text{АЧТ}} \quad (1)$$

Для абсолютно серого тела (АСТ):

$$a_{\lambda} \equiv a = \text{const} \quad (2)$$

Если бы нить излучала как АЧТ, то баланс потребляемой и излучаемой энергии определялся бы соотношением:

$$W = \sigma S (T^4 - T_0^4) \quad (3)$$

где W — потребляемой нитью электрическая мощность, S — площадь излучаемой поверхности нити, T — температура нити, T_0 — температура окружающей среды, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{К}^4}$ — постоянная Стефана-Больцмана.

Если считать нить серым телом и его излучение ослаблено на ε_T по сравнению с АЧТ, то:

$$W = \varepsilon_T S \sigma T^4 \quad (4)$$

Коэффициент ε_T зависит от температуры следующим образом для вольфрама:

При выполнении работы также потребуется вычислить постоянную планка h с помощью постоянной Стефана-Больцмана σ . Приведём необходимую формулу ниже:

T, K	1700	1800	1900	2000
ε_T	0.209	0.223	0.236	0.249

Таблица 1. $\varepsilon_T(T)$ для вольфрама

$$h = \sqrt[3]{\frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2\sigma}} \quad (5)$$

Экспериментальная установка:

На рис. 2 изображена экспериментальная установка. Она состоит из оптического пирометра 9, модели АЧТ, трёх образцов (18, 19, 20), блока питания (1) и цифровых вольтметров В7-22А и В7-38.

1. Блок питания
2. Тумблер включения питания пирометра и образцов
3. Тумблер нагрева нити пирометра «Быстро» — вверх, «Медленно» — вниз
4. Кнопка «Нагрев нити»
5. Кнопка «Охлаждение нити»
6. Тумблер переключения образцов
7. Регулятор мощности нагрева образцов
8. Окуляр пирометра
9. Корпус пирометра
10. Объектив пирометра
11. Переключение диапазонов: $700 - 1200\text{ }^{\circ}C$ — вниз, $1200 - 2000\text{ }^{\circ}C$ — вверх
12. Ручка перемещения красного светофильтра
13. Регулировочный винт
14. Вольтметр (напряжение на лампе накаливания)
15. Амперметр (ток через образцы)

16. Вольтметр в цепи термопары
17. Модель АЧТ
18. Трубка с кольцами из материалов с разной излучательной способностью
19. Лампа накаливания
20. Неоновая лампочка

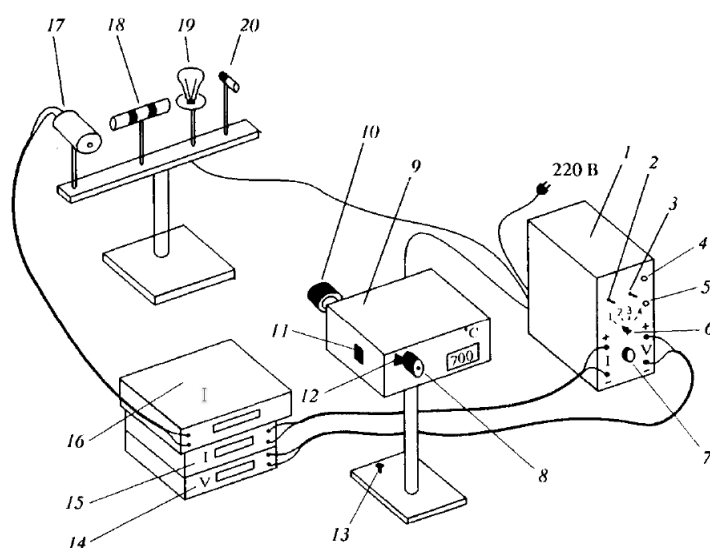


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

Ход работы:

I. Изучение работы оптического пирометра.:

1. Включим модель АЧТ, дадим ей прогреться (приблизительно до 37.5 мВ на термопаре). Далее включим пирометр и измерим температуру (температуры тела и нити считаются равными, когда нить сливается с ним). Также укажем ожидаемую температуру (используя постоянную термопары 41 мкВ).

Из таблицы видно, что температуры отличаются в пределах 3%, т. е. пирометр настроен верно.

направление	вверх	вверх	вниз	вниз
U , мВ	37.97	37.91	38.04	37.92
$T_{\text{ярк}}$	926	937	934	938
$T_{\text{терм}}$	926	925	928	925

Таблица 2. Измерения на АЧТ

II. Измерение яркостной температуры накали́нных тел.:

2. Посмотрим, как различные тела при одной и той же температуре имеют яркостную температуру. Для этого измерим температуру колец. Результаты см. в таблице 3.

объект	левое кольцо	керамика	правое кольцо
T , °C	800	846	784

Таблица 3. Кольца

III. Проверка закона Стефана-Больцмана.:

3. Теперь измерим напряжение и силу тока через лампочку с нитью накаливания площадью $S = 0.36 \text{ см}^2$, изменяя её яркостную температуру от 900 до 1900 $^{\circ}\text{C}$. Результаты представлены в таблице 4.

$T_{\text{ярк}}, ^{\circ}\text{C}$	900	1000	1100	1200	1300	1400
$U, \text{В}$	1.710	1.973	2.449	2.942	3.214	3.891
$I, \text{А}$	0.485	0.511	0.558	0.603	0.627	0.684

$T_{\text{ярк}}, ^{\circ}\text{C}$	1500	1600	1700	1800	1900
$U, \text{В}$	4.660	5.287	6.243	7.245	7.797
$I, \text{А}$	0.745	0.793	0.861	0.929	0.964

Таблица 4. Лампа

4. Теперь определим с помощью этих данных выделяемую на лампе мощность и термодинамическую температуру (с помощью графика 1).

$T_{\text{ярк}}, ^{\circ}\text{C}$	900	1000	1100	1200	1300	1400
$T_{\text{терм}}, \text{K}$	1210	1320	1430	1530	1640	1740
$W, \text{Вт}$	0.83	1.01	1.37	1.77	2.02	2.66

$T_{\text{ярк}}, ^{\circ}\text{C}$	1500	1600	1700	1800	1900
$T_{\text{терм}}, \text{K}$	1850	1960	2060	2170	2270
$W, \text{Вт}$	3.47	4.19	5.38	6.73	7.52

Таблица 5. Ещё лампа

5. Построим графики $W = f(T)$ (см. рис. 3) и $\ln W = f(\ln T) = \ln(\varepsilon_T \sigma S) + n \ln T$ (см. рис. 4).

6. Из графика с помощью МНК получаем:

$$n = 4.01 \pm 0.12$$

$$\ln(\varepsilon_T \sigma S) = -26.91 \pm 0.01$$

Стоит отметить, что график строился только по тем точкам, у которых $T > 1700 \text{ K}$. Это сделано из-за того, что при меньших температурах существует зависимость $S(T)$, которую невозможно учесть. Начиная же с таких температур нить накаляется полностью, т. е. $S = 0.36 \text{ см}^2 = \text{const.}$ Но при этом необходимо учесть, что ε_T тоже зависит от температуры. Для этого была использована таблица 1.

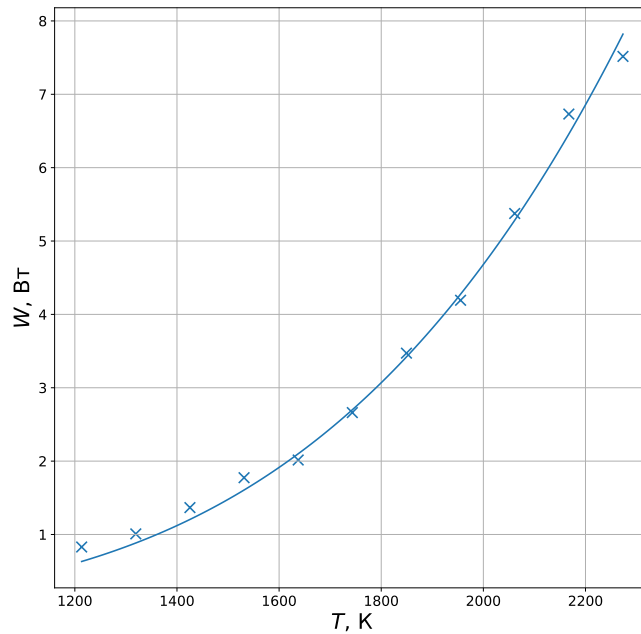


Рис. 3. График $W = f(T)$

Также заметим, что теоретическое значение $n = 4$ (см. (4)). Полученное экспериментальное значение сходится с теоретическим. Звучит нереалистично.

7. Для каждого значения $T > 1700$ К найдём постоянную Стефана-Больцмана по формуле 4. Результаты представлены в таблице 6.

T, K	1740	1850	1960	2060	2170	2270
$\sigma, \frac{Вт}{см^2 \cdot K^4}$	$3.76 \cdot 10^{-12}$	$3.62 \cdot 10^{-12}$	$3.28 \cdot 10^{-12}$	$3.21 \cdot 10^{-12}$	$3.11 \cdot 10^{-12}$	$2.72 \cdot 10^{-12}$

Таблица 6. $\sigma(T)$

Как видно, полученные значения отличаются в 1.5-2 раза. Вероятно, проблема в неверно указанном S на установке.

8. Теперь с помощью формулы (5) найдём постоянную планка. Очевидно, что оно будет неверно, ну да и ладно. Результаты — в табл. 7.

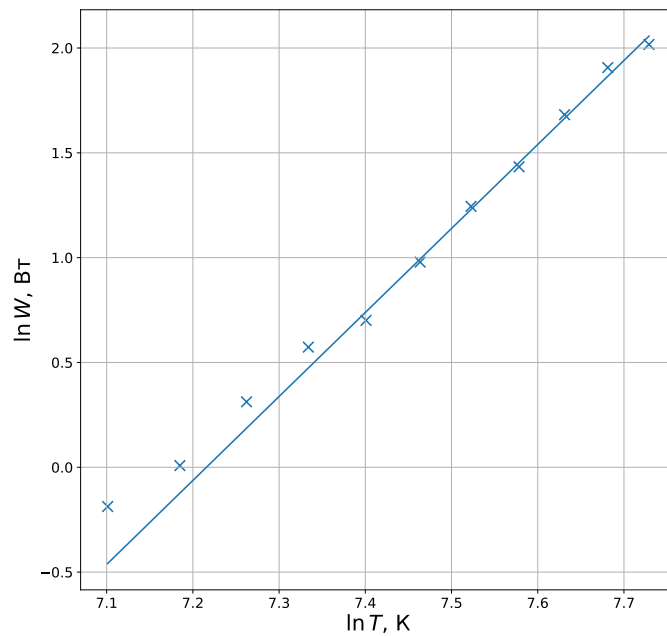


Рис. 4. График $\ln W = f(\ln T)$

T, K	1740	1850	1960	2060	2170	2270
$h, \text{Дж} \cdot \text{с}$	$7.60 \cdot 10^{-34}$	$7.69 \cdot 10^{-34}$	$7.95 \cdot 10^{-34}$	$8.01 \cdot 10^{-34}$	$8.10 \cdot 10^{-34}$	$8.47 \cdot 10^{-34}$

Таблица 7. $h(T)$

IV. Измерение «яркостной температуры» неоновой лампочки.:

9. Теперь направим пирометр на неоновую лампочку. Находим $T_{\text{ярк}} = 830 \text{ K}$. Но при этом она холодная на ощупь. Это означает, что природа свечения в ней другая.