

Бичина Марина Б04-005, Лабораторная работа №.5.8.1 «Определение постоянных Стефана-Больцмана и Планка из анализа теплового излучения накаливаемого тела»

Цель работы:

1. Измерить температуры оптическим пирометром с исчезающей нитью
2. Измерить температуру с помощью термопары
3. Исследовать излучение накаливаемых тел с различной испускательной способностью
4. Определить постоянные Планка Стефана-Больцмана

Оборудование:

1. оптический пирометр
2. модель АЧТ
3. образцы колец
4. вольфрамовая лампа
5. неоновая лампа
6. блок питания
7. цифровые вольтметры

Теоретическая справка:

В оптической пирометрии различают три температуры, функционально связанные с истинной термодинамической температурой и излучательной способностью тела: **радиационную** $T_{\text{рад}}$, **цветовую** $T_{\text{цв}}$ и **яркостную** $T_{\text{ярк}}$. В работе измеряется яркостная температура.

Яркостная температура - это температура абсолютно чёрного тела, при которой его спектральная испускательная способность равна спектральной испускательной способности исследуемого тела при той же длине волны.

Измерение яркостной температуры раскалённого тела производится при помощи оптического пирометра с исчезающей нитью, основанного на визуальном сравнении яркости раскалённой нити с яркостью изображения исследуемого тела.

Яркостная температура тела всегда ниже его термодинамической температуры. Это связано с тем, что любое нечёрное тело излучает меньше, чем АЧТ при той же температуре. Зависимость между яркостной и термодинамическими температурами вольфрама приведена на рис. 1

По результатам измерений мощности излучения вольфрамовой нити можно судить о справедливости закона Стефана-Больцмана. Если бы нить излучала как АЧТ, то баланс потребляемой и излучаемой энергии определялся бы соотношением

$$W = \sigma S(T^4 - T_0^4), \quad (1)$$

где W - потребляемая нитью электрическая мощность, S - площадь излучающей поверхности нити, T - температура нити, T_0 - температура окружающей среды. Однако

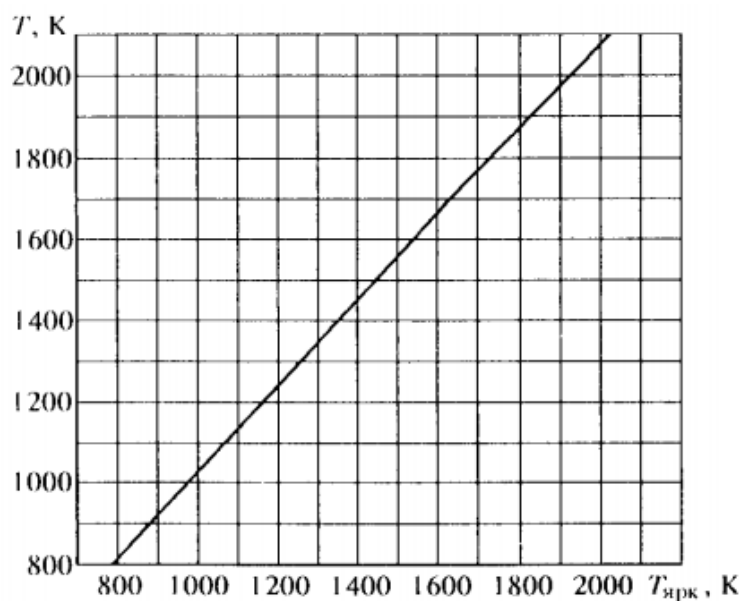


Рис. 1: График зависимости $T = f(T_{\text{ярк}})$ для вольфрама

вольфрамовая нить излучает как серое тело, и излучение её ослаблено по сравнению с АЧТ в ε_T раз для любой волны при данной температуре тела T . Тогда предположив, что нить излучает как серое тело и с учётом того, что $T_0 \ll T$, выражение (1) можно переписать в виде

$$W = \varepsilon_T S \sigma T^4 \quad (2)$$

В справедливости закона Стефана-Больцмана можно убедиться, построив график зависимости $W(T)$ в логарифмическом масштабе и по углу наклона определить показатель степени n исследуемой температурной зависимости. В пределах погрешности показатель степени должен быть близок к четырём.

Также из формулы (2) можно определить постоянную Стефана-Больцмана.

Описание установки:

Основные элементы установки:

- 1 – блок питания
- 9 – пирометр в двух диапазонах: $700 - 1200^\circ\text{C}$ и $1200 - 2000^\circ\text{C}$
- 14 – вольтметр (напряжение на лампе накаливания)
- 15 – амперметр (ток через образцы)
- 16 – вольтметр (цепь термопары)
- 17 – модель АЧТ
- 18 – трубка с кольцами из материалов с разной излучательной способностью
- 19 – лампа накаливания
- 20 – неоновая лампочка

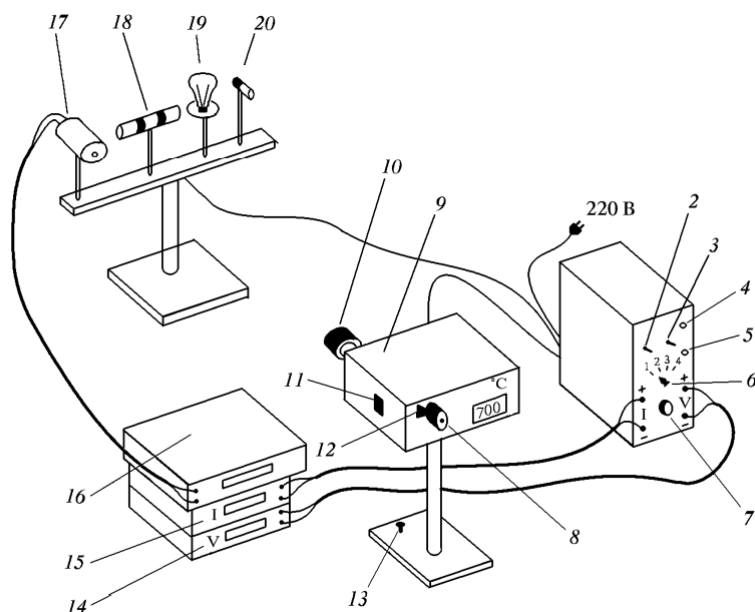


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

Ход работы:

1. Изучение работы оптического пирометра

- (1) Прогреем модель АЧТ. Настроим пирометр на необходимый диапазон температур.
- (2) Снимем показания пирометра: для этого, глядя в оптическую трубу, будем изменять ток, пропускаемый через нить пирометра, до тех пор, пока нить не исчезнет на фоне раскаленной поверхности АЧТ.
- (3) Измерим температуру АЧТ при помощи термопары
- (4) Полученные данные сведем в таблицу 1
- (5) Видим, что для данных измерений погрешность составляет менее 5%. Следовательно, для АЧТ корректно определять температуру таким способом.

температура, снятая с помощью пирометра, °C	939	948	956
напряжение, на термопаре, мВ	38.6	38.7	39.0
температура, снятая с помощью термопары, °C	941	944	951

Таблица 1: Температура АЧТ

2. Измерение яркостной температуры тел

Покажем, что разные тела, нагретые до одинаковой термодинамической температуры, имеют различную яркостную температуру

- (1) Прогреем керамическую трубку с кольцами.
- (2) Пронаблюдаем за образцами: Видим, что один образец изменил цвет на ярко-красный, другой остался практически таким же темным.

- (3) Сделаем вывод о том, что яркостная и термодинамическая температура могут не совпадать. Это может быть связано с тем, что обе величины связаны через спектральный коэффициент поглощения, который различен у разных материалов.

3. Проверка закона Стефана-Больцмана

- (1) Рассмотрим диапазон, в котором мы можем снимать показания: для нас это с 1.33 мА (при меньшем токе нить накала не горит) до 8 мА (максимальный ток). В данном диапазоне снимем 20 точек.

- (2) Полученные данные занесем в таблицу 2

- (3) Удостоверимся в справедливости закона Стефана-Больцмана: в логарифмическом масштабе построим график зависимости мощности от температуры.

Воспользуемся формулой $W = \varepsilon_T S \sigma T^n = \text{const} \cdot T^n$.

Возьмем логарифм: $\ln W = \ln \text{const} + n \ln T = \text{const} + n \ln T \sim n \ln T$

Из закона Джоуля-Ленца: $W \sim I^2$

Тогда $2 \cdot \ln I \sim n \ln T \Rightarrow n = \frac{2 \cdot \ln I}{\ln T} = \frac{2 \cdot \ln W}{\ln T}$

- (4) Построим график зависимости логарифма мощности от логарифма температуры (график 3) и найдем n

- (5) Из графика получим прямую $y = (4.17 \pm 0.08)x + (-28.2 \pm 0.6)$, откуда $n = 4.17 \pm 0.08$.

Можем заключить, что мощность зависит от температуры как $W \sim T^4$, что соответствует закону Стефана-Больцмана

- (6) Определим значение постоянной Планка по формуле:

Номер измерения, N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сила тока I, мА	1.32	1.53	1.69	2.02	2.19	2.42	2.75	2.75	3.07	3.42
Термодинамическая температура, °C	849	904	932	998	1069	1124	1174	1195	1284	1373
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Сила тока I, мА	3.87	4.12	4.53	4.95	5.53	5.95	6.34	6.75	7.14	7.54
Термодинамическая температура, °C	1439	1477	1542	1604	1644	1691	1740	1788	1825	1847

Таблица 2: Значения температуры нити накала и силы тока на лампе

4. Определения постоянных Планка и Стефана-Больцмана

- (1) Из формулы (2) получим, что постоянная Стефана-Больцмана выражается как:

$$\sigma = \frac{W}{\varepsilon_T S T^4} \quad (3)$$

где ε_T – табличное значение коэффициента излучения при различных температурах

S – эффективная площадь излучающей поверхности, $S = 0.36$ см

T – температура нити

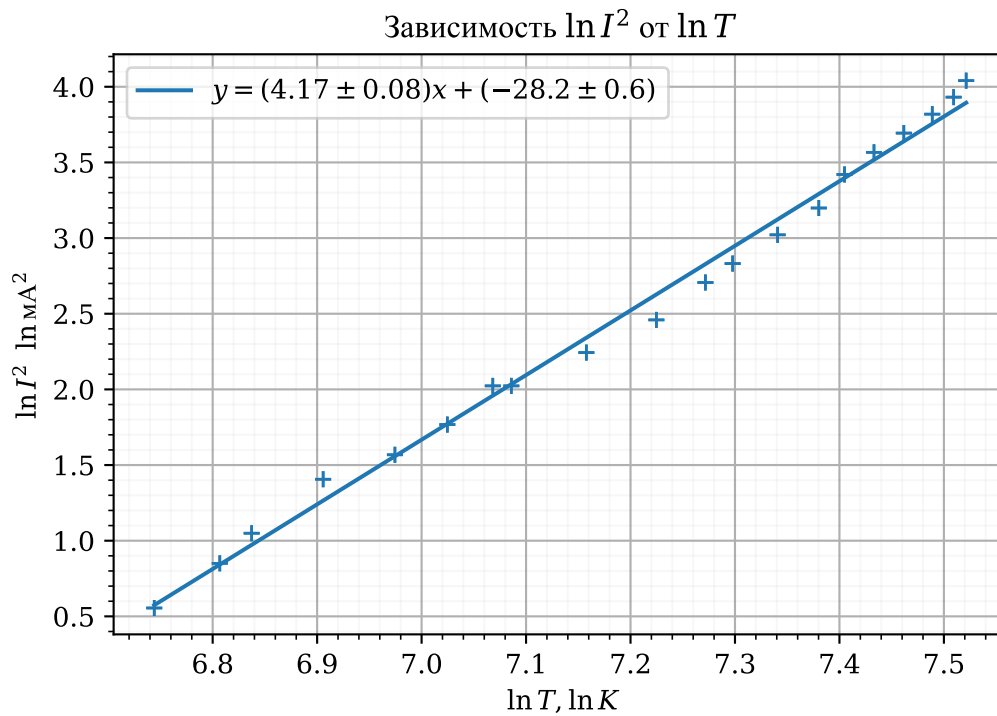


Рис. 3: График зависимости силы тока от температуры в логарифмических координатах

W – мощность

σ – постоянная Стефана-Больцмана

Погрешность в данном случае можно выразить как

$$\Delta\sigma = \sqrt{\left(\frac{\Delta W}{W}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2}$$

При расчетах берем среднее сопротивление, равное $R = 0.14$ Ом, предполагая линейную зависимость между силой тока и сопротивлением при данном диапазоне температур

- (2) Полученные данные для постоянной Стефана-Больцмана занесем в таблицу 3

T, K	1750	1815	1877	1917	1964	2013	2061	2098	2120
σ , СГС 10^{-5}	5.16	5.03	4.72	4.72	4.37	4.31	4.32	4.27	4.05
$\Delta\sigma$, СГС 10^{-5}	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06

Таблица 3: Значения постоянной Стефана-Больцмана

- (3) По полученным данным получим среднее значение константы Стефана-Больцмана:

$$\bar{\sigma} = (4.55 \pm 0.08) \cdot 10^{-5} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{K}^4 \text{с}}$$

(4) Определим постоянную Планка по формуле:

$$h = \sqrt{\frac{2\pi^2 k_B^4}{15c^2 \sigma}}$$

Подставляя усредненное значение $\sigma = \bar{\sigma}$ получим $h = (7.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-27}$ эрг·с

5. Измерение яркостной температуры неоновой лампочки

Подключим неоновую лампочку к источнику питания и направим на нее пирометр. Значение на пирометре соответствует температуре $T = 900^\circ C$, но при касании лампочка является холодной.

Явление связано с тем, что излучение лампочки происходит в дискретном спектре, в отличие от разогретых тел

Выводы:

1. На модели АЧТ убедились в исправности пирометра
2. Убедились, что при одной и той же термодинамической температуре может быть разной яркостная температура у различных материалов
3. Проверили закон Стефана-Больцмана ($W \sim T^4$)
4. Нашли значение постоянной Стефана-Больцмана, равной $\sigma = (4.55 \pm 0.08) \cdot 10^{-5} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 K^4 c}$
5. Нашли значение постоянной Планка $h = (7.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-27}$ эрг·с
6. Убедились в том, что термодинамическая температура для неоновой лампочки гораздо ниже яркостной. Объясняется тем, что излучение лампочки происходит в дискретном спектре