

Работа 5.8.1

Определение постоянных Стефана-Больцмана и Планка из анализа теплового излучения накаливаемого тела

Богданов Александр
Б05-003

22 сентября 2022 г.

Цель работы:

1. При помощи модели абсолютно чёрного тела проведение измерения температуры оптическим пирометром с исчезающей нитью и термопарой.
2. Исследование излучений накаливаемых тел с различной испускательной способностью.
3. Определение постоянных Планка и Стефана-Больцмана.

В работе используются: оптический пирометр, модель абсолютно чёрного тела, образцы колец, вольфрамовая лампа, неоновая лампа, блок питания, цифровые вольтметры.

Теоретические положения:

Для измерения температуры разогретых тел, удаленных от наблюдателя, применяют методы оптической 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 $T_{\text{ярк}}$.

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 не чёрное тело излучает меньше, чем АЧТ при той же температуре. Зависимость между яркостной и термодинамическими температурами вольфрама приведена на рис. 1

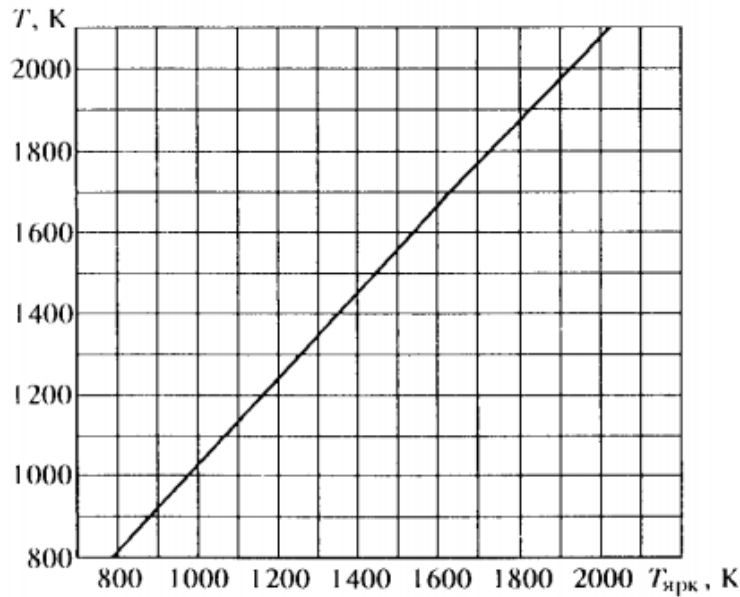


Рис. 1: График зависимости $T = f(T_{\text{ярк}})$ для вольфрама

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:

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

где W – потребляемая нитью электрическая мощность, S – площадь излучающей поверхности нити, T – температура нити, T_0 – температура окружающей среды. Однако 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 можно переписать в виде:

$$W = \varepsilon_T S \sigma T^4$$

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 можно определить постоянную Стефана-Больцмана.

Экспериментальная установка:

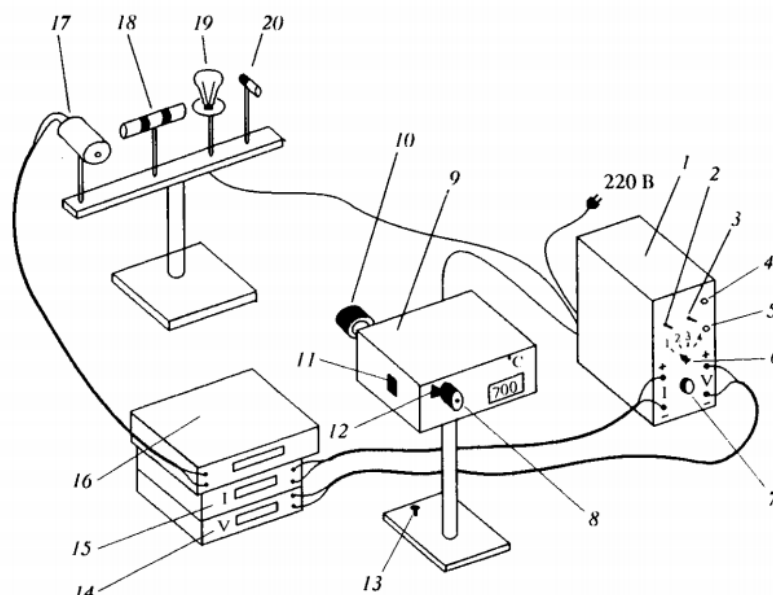


Рис. 2: Схема экспериментальной установки: 1 - блок питания; 2 - тумблер включения питания образцов; 3 - тумблер нагрева нити пирометра; 4 - кнопка "Нагрев нити"; 5 - кнопка "охлаждение нити"; 6 - тумблер переключения образцов; 7 - регулятор мощности нагрева образцов; 8 - окуляр пирометра; 9 - корпус пирометра; 10 - объектив пирометра; 11 - переключение диапазонов; 12 - ручка смещения 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 различной излучательной способностью; 19 - лампа накаливания; 20 - неоновая лампочка

Исследуемые образцы:

1. Модель абсолютно чёрного тела – керамическая трубка, закрытая с одного конца и окружённая для теплоизоляции внешним кожухом. Температура в трубке измеряется с помощью термопары хромель-алюмель.
2. Керамическая трубка с набором колец из различных материалов, нагреваемая изнутри нихромовой спиралью. Материалы колец имеют различную излучательную способность.
3. Вольфрамовая нить электрической лампочки.

Ход работы:

1. Изучение оптического пирометра

С помощью пирометра измерим температуры АЧТ и проведем сравнение ее значения со значением температуры, измеренной при помощи термопарного термометра.

- (а) Настроим установку, прогреем нить, прогреем модель АЧТ, введем красный светофильтр пирометра. Изменяя ток через нить пирометра, добьемся исчезновения нити на фоне изображения раскаленной поверхности дна АЧТ.

- (b) По шкале пирометра определим значения яркостной температуры АЧТ. Также при помощи хромель-алюмелевой термопары и цифрового вольтметра определим температуру модели АЧТ. Постоянная термопары равна $41\text{мкВ}/^\circ\text{C}$, а комнатная температура равна 20°C .

Напряжение, мВ	Температура(термопара), $^\circ\text{C}$	Температура(пирометр), $^\circ\text{C}$	Разность значений, %
48,0	1191	1197	0,5
41,3	1027	1051	2,3
37,5	935	961	2,8

Как видно из таблицы относительная погрешность не превышает 2,8%. Следовательно пирометр работает исправно.

2. Измерение яркостной температуры накаливаемых тел

Убедимся, что различные тела, накаливаемые до одинаковой термодинамической температуры, имеют различную яркостную температуру.

Нагреем трубку до темно-красного каления и измерим температуру поверхности трубки и колец.

	$T_{\text{ярк}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma T_{\text{ярк}}, ^\circ\text{C}$
Керамическая трубка	966	27
Металлическая трубка	885	25

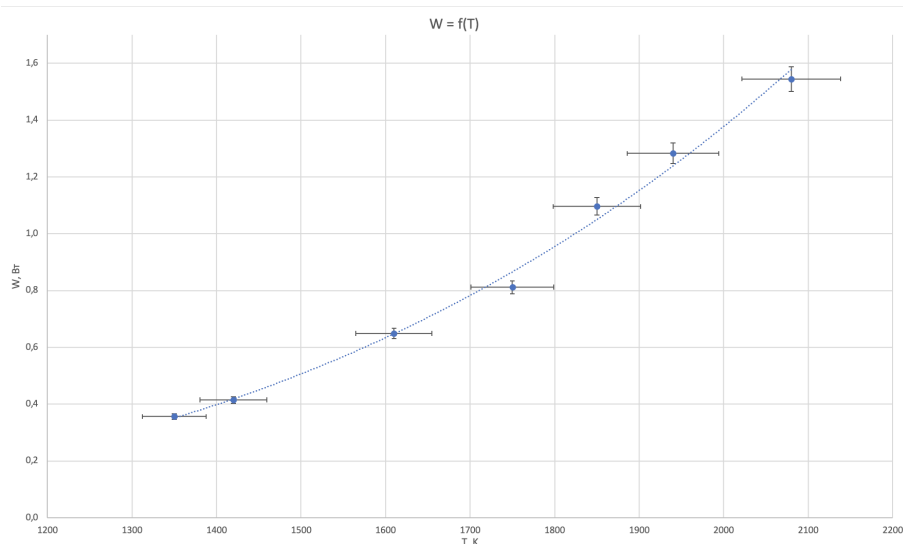
Несовпадение яркостной температуры у различных тел, имеющих одинаковую термодинамическую температуру связано с тем, что эти две величины связаны.

3. Проверка закона Стефана - Больцмана

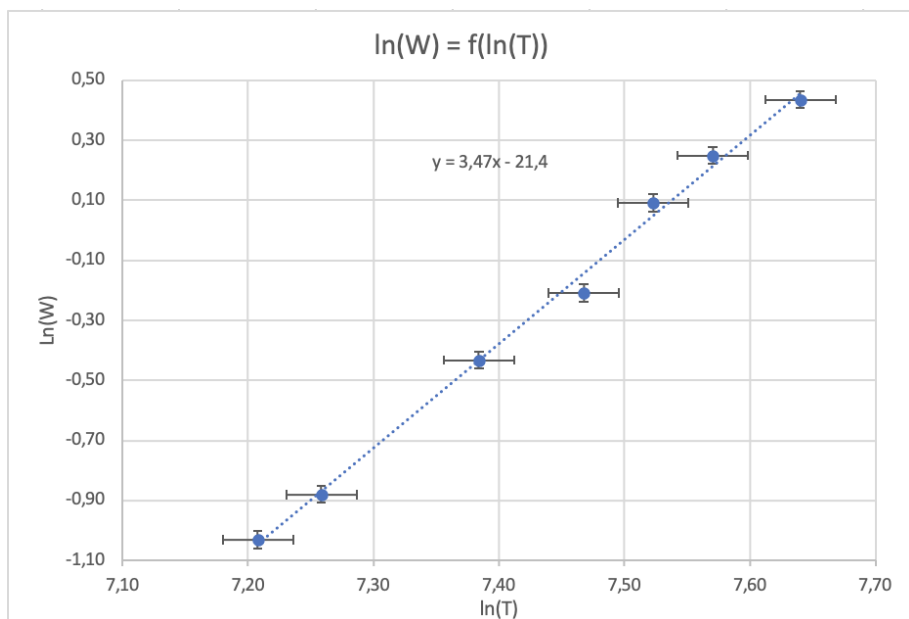
- (a) Постепенно увеличивая накал нити лампы, измерим пирометром яркостную температуру. При каждом измерении температуры, будем записывать величины тока и падения напряжения на нити лампы.
- (b) Для каждого значения яркостной температуры найдем термодинамическую температуру вольфрамовой нити лампы, а также посчитаем мощность, потребляемую нитью лампы.

$T_{\text{ярк}}, \text{K}$	T, K	$\sigma T, ^\circ\text{C}$	I, A	$\sigma I, \text{A}$	U, B	$\sigma U, \text{B}$	$W, \text{Вт}$	$\sigma W, \text{Вт}$
1310	1350	38	0,915	0,018	0,39	0,008	0,36	0,01
1386	1420	40	0,965	0,019	0,43	0,009	0,41	0,01
1579	1610	45	1,119	0,022	0,58	0,012	0,65	0,02
1683	1750	49	1,212	0,024	0,67	0,013	0,81	0,02
1786	1850	52	1,337	0,027	0,82	0,016	1,10	0,03
1885	1940	54	1,410	0,028	0,91	0,018	1,28	0,04
1991	2080	58	1,515	0,030	1,02	0,02	1,55	0,04

- (c) Построим график $W = f(T)$:



- (d) Представим зависимость $W = f(T)$ в логарифмическом масштабе как $\ln(W) = \ln(\varepsilon_T \sigma S) + n \ln(T)$. По углу наклона графика определим показатель степени температуры в законе Стефана-Больцмана:



По углу наклона определяем показатель степени: $3,47 \pm 0,44$ при теоретическом значении 4.

- (e) Определим постоянную Стефана-Больцмана, используя значение термодинамической температуры 1850К и соответствующую мощность ($\varepsilon_T(1850) \approx 0.233$, $S = 0.36 \text{ см}^2$):

$$\sigma = \frac{W}{\varepsilon_T S T^4} = (1,32 \pm 0,12) \cdot 10^{-12} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^4)$$

Также можно определить постоянную Стефана-Больцмана, используя построенный график зависимости $\ln(W) = \ln(\varepsilon_T \sigma S) + n \ln(T)$

$$\ln(\varepsilon_t \sigma S) = -21,4 \pm 0,9$$

$$\sigma = \frac{e^{-21.4}}{\varepsilon_T S} = (1,71 \pm 0,15) \cdot 10^{-12} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{K}^4)$$

(f) Оценим значение постоянной Планка:

$$h = \sqrt[3]{\frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 \sigma}} \approx (0,91 \pm 0,15) \cdot 10^{-26} \text{ эрг} \cdot \text{с}$$

4. Измерение яркостной температуры неоновой лампочки

Термодинамическая температура неоновой лампочки примерно равна комнатной, и не соответствует её яркостной температуре ($\approx 868^\circ\text{C}$). Неоновая лампочка не является моделью абсолютно чёрного или серого тела, и её излучение носит совершенно другую природу.

Вывод:

В ходе работы было изучено тепловое излучение модели абсолютно чёрного тела и моделей серых тел - колец из различных материалов и вольфрамовой нити. Было проведено ознакомление с принципом работы оптического пирометра.

При проведении работы мы наблюдали, что для различных материалов с одинаковой термодинамической температурой их яркостная температура может не совпадать.

В работе было предложено проверить справедливость закона Стефана-Больцмана ($W \propto T^4$). Данную зависимость удалось получить – значение степени при T составляет $(3.47 \pm 0,44)$, что совпадает в пределах погрешности с 4.

Также по результатам измерений была оценена постоянная Стефана-Больцмана двумя способами: с помощью формулы и используя график зависимости $W(T)$ в логарифмическом масштабе. Второй способ оказался более точным:

$$\sigma_1 = (1,32 \pm 0,12) \cdot 10^{-12} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{K}^4)$$

$$\sigma_2 = (1,71 \pm 0,15) \cdot 10^{-12} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{K}^4)$$

$$\sigma_{\text{теор}} = 5.67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{K}^4)$$

С помощью σ мы смогли получить постоянную Планка:

$$h = (0,91 \pm 0,15) \cdot 10^{-26} \text{ эрг} \cdot \text{с}$$

$$h_{\text{теор}} = 0,66 \cdot 10^{-26} \text{ эрг} \cdot \text{с}$$

В ходе работы с помощью пирометра была определена "яркостная температура" неоновой лампочки, не являющейся моделью АЧТ. Эта яркостная температура не совпадает с термодинамической.