

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ

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

выполнил студент Б04-852 группы ФЭФМ

Яромир Водзяновский

Содержание

1	Цель работы	2
2	Оборудование	2
3	Теория	2
4	Экспериментальная установка	4
5	Ход работы	4
5.1	Изучение работы оптического пирометра	4
5.2	Измерение яркостной температуры накаливаемых тел	5
5.3	Проверка закона Стефана-Больцмана	5
5.4	Измерение яркостной температуры неоновой лампочки	7
6	Вывод	7

1 Цель работы

- При помощи модели абсолютного черного тела провести измерения температуры оптическим пирометром с исчезающей нитью и термопарой
- Исследовать излучение накаливаемых тел с различной излучательной способностью
- Определить постоянные Планка и Стефана-Больцмана

2 Оборудование

- Оптический пирометр
- Вольфрамовая лампа
- Неоновая лампа
- Образцы колец
- Модель АЧТ
- Блок питания
- Вольтметры
- Библиотеки numpy, scipy, matplotlib, pandas в python 3 для обработки данных

3 Теория

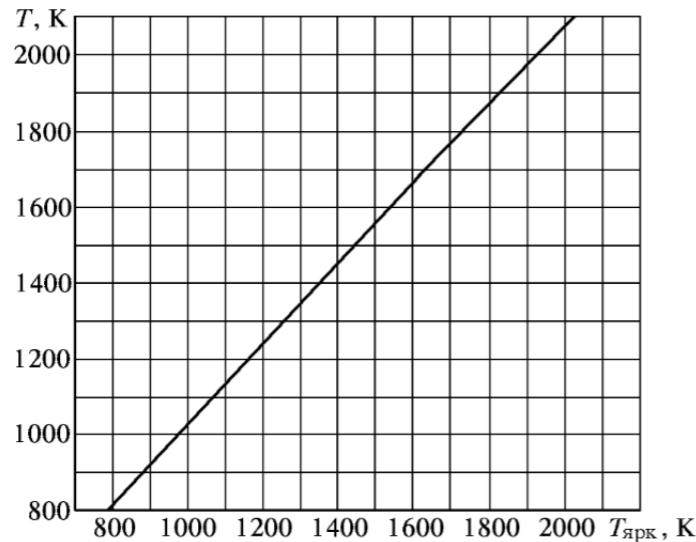
Для измерения температуры разогретых тел, можно применять методы оптической пирометрии, основанные на зависимости излучательной способности от температуры. Различают три температуры, функционально связанные с истинной термодинамической температурой и излучательной способностью тела:

1. **Радиационную** $T_{\text{рад}}$ - температура АЧТ, при которой его интегральная излучательная способность = интегральной излучательной способности исследуемого тела.
2. **Цветовую** $T_{\text{цв}}$ - температура АЧТ, при которой отношение их спектральных излучательных способностей для двух заданных длин волн одинаково.
3. **Яркостную** $T_{\text{ярк}}$ - температура АЧТ, при которой его спектральная излучательная способность равна спектральной излучательной способности исследуемого тела при той же длине волны. Именно эту температуру мы будем измерять.

Измерение яркостной температуры производится с помощью оптического пирометра с исчезающей нитью, мы визуально сравниваем яркость нити с яркостью исследуемого тела. Равенство видимых яркостей наблюдается через монохроматический светофильтр ($\lambda = 6500 \text{ \AA}$) фиксируется по исчезновению нити на фоне раскаленного тела.

Температура нити регулируется силой тока через нее. Шкалу прибора, измеряющего ток через нить градуируют по АЧТ, термодинамическую температуру которого измеряют через термопару. Если тело, температуру которого мы хотим измерить излучает как АЧТ, то мы можем с помощью пирометра найти его температуру. Если тело излучает по другому, то мы найдем его яркостную температуру. Яркостная температура всегда ниже чем термодинамическая, т.к. любое нечерное тело излучает меньше, чем АЧТ при той же температуре.

В этой работе используем пирометр проградуированный при изготовлении по АЧТ. Вначале с помощью модели АЧТ проверим правильность работы пирометра, а затем с его помощью исследуем излучение различных материалов. Необходимая для обработки данных зависимость между яркостной и термодинамической температурами для вольфрама на рис. 1

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

По результатам измерения сможем судить о справедливости закона Стефана-Больцмана. Приравняем мощность, потребляемую нитью к излучаемому ею за единицу времени кол-ву энергии. Если бы нить была АЧТ:

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

где W - потребляемая мощность, S - площадь, T - температура нити, T_0 - температура окр. среды.

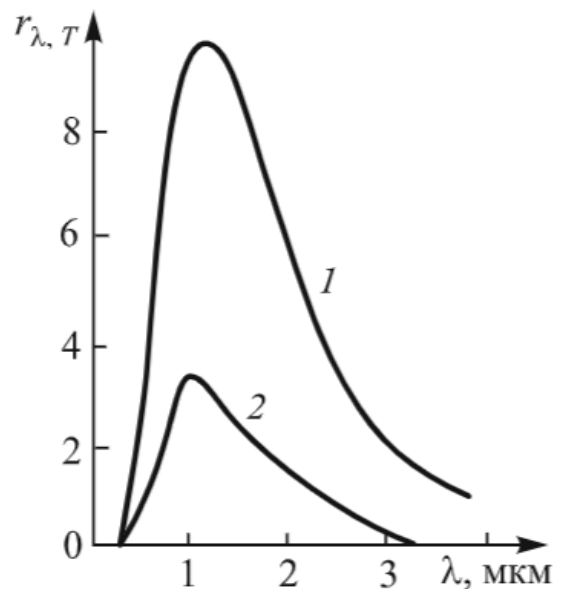
Однако вольфрам является серым телом, т.е. спектр излучения подобен спектру АЧТ, но ослаблен в ε_T раз:

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

Значение коэффициента излучения ε_T от температуры приведена на рис. 2

T, K	$\varepsilon_{\lambda, T} (\lambda = 6500 \text{ \AA})$	ε_T
800	0,460	0,067
900	0,458	0,081
1000	0,456	0,105
1100	0,454	0,119
1200	0,452	0,133
1300	0,450	0,144
1400	0,448	0,164
1500	0,446	0,179
1600	0,443	0,195
1700	0,441	0,209
1800	0,439	0,223
1900	0,437	0,236
2000	0,435	0,249

Рис. 2: Поправочные коэффициенты излучения для вольфрама

Рис. 3: Распределение энергии в спектре излучения: 1 - АЧТ, 2 - вольфрам. $T = 2450 \text{ K}$

Измерив температуру вольфрамовой нити от подводимой мощности можно проверить закон С-Б, т.е. построить $W(T)$ в логарифмическом масштабе и получить показатель степени $n \approx 4$ как коэф. наклона. А из ф-лы (2) можно найти σ .

Однако отличие полученных экспериментально величин может не совпадать с теорией по причине селективности излучения вольфрама: при $T = 2400\text{ K}$, излучение видимой области спектра существенно больше, чем следует из распределения Планка. Эта разница отображена на рис. 3.

Проведя измерения в диапазоне $800 - 1500\text{ }^\circ\text{C}$ получим значения σ и n достаточно точно.

4 Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 4)

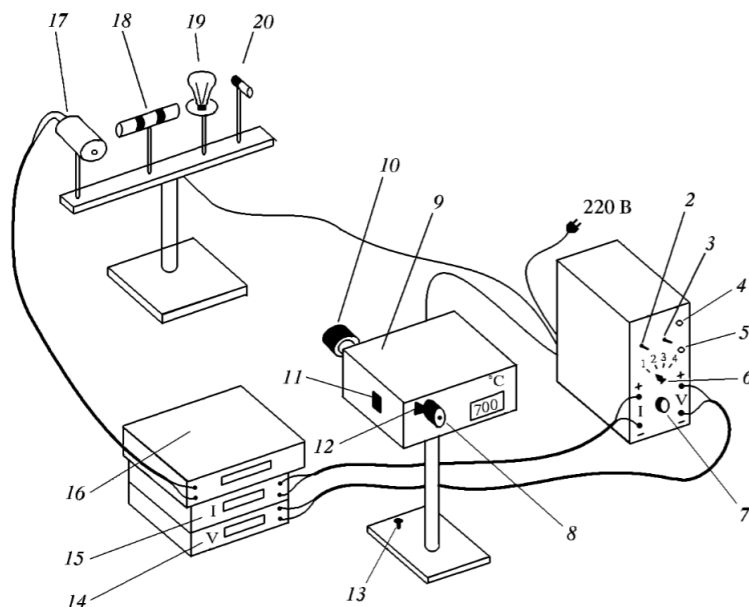


Схема экспериментальной установки: 1 — блок питания; 2 — тумблер включения питания пирометра и образцов; 3 — тумблер нагрева нити пирометра: «Быстро» — вверх, «Медленно» — вниз; 4 — кнопка «Нагрев нити»; 5 — кнопка «Охлаждение нити»; 6 — тумблер переключения образцов; 7 — регулятор мощности нагрева образцов; 8 — окуляр пирометра; 9 — корпус пирометра; 10 — объектив пирометра; 11 — переключение диапазонов: $700-1200\text{ }^\circ\text{C}$ — вниз, $1200-2000\text{ }^\circ\text{C}$ — вверх; 12 — ручка перемещения красного светофильтра; 13 — регулировочный винт; 14 — переключение диапазонов: $700-1200\text{ }^\circ\text{C}$ — вниз, $1200-2000\text{ }^\circ\text{C}$ — вверх; 15 — амперметр (ток через образцы); 16 — вольтметр (напряжение на лампе накаливания); 17 — модель АЧТ; 18 — трубка с кольцами из материалов с разной излучательной способностью; 19 — лампа накаливания; 20 — неоновая лампочка

Рис. 4

Модель АЧТ представляет собой керамическую трубку диаметром 3 мм и длиной 50 мм, закрытую с одного конца и окруженную внешним кожухом. Нагрев трубки осуществляется намотанной на нее нихромовой спиралью, питаемой от источника тока. Температура АЧТ измеряется хромель-алюмелевой термопарой, один спай находится в дне трубки, а другой — в вольтметре, измеряющего ЭДС термопары.

В работе используется три образца. Один образец в виде керамической трубки с набором колец из различных материалов, спираль может нагреваться до $1000\text{ }^\circ\text{C}$.

Другой образец — вольфрамовая нить электрической лампочки. Сила тока через нить измеряется амперметром 15, падение напряжения на самой нити измеряется вольтметром 16. Так мы сможем определить мощность подаваемого на нить.

5 Ход работы

5.1 Изучение работы оптического пирометра

В этой части работы с помощью пирометра измеряется температура модели АЧТ и проводится сравнение ее значения со значением температуры термопарного термометра.

1. Выведем серый и красный светофильтры из пирометра.

2. Подключим пирометр к сети и доведем показания до $\sim 900 - 950^\circ C$. В окуляре увидим раскаленную нить. Направим пирометр на модель АЧТ, подадим на него напряжение и максимальную мощность, через 10-15 мин. оно нагреется и мы должны увидеть четкое изображение дна модели.
3. Введем красный фильтр пирометра.
4. Определим по шкале пирометра значения яркостной температуры АЧТ. Одновременно определим температуру АЧТ по термопаре и цифрового вольтметра 16. Постоянная термопары 41 мкВ/ $^\circ C$.

$$t_{\text{пир}} \approx 920^\circ C$$

$$t_{\text{ТП}} = \frac{39.51 \text{ В}}{41 \text{ мкВ}/^\circ C} \approx 964^\circ C$$

Показания отличаются менее чем на 5%

5.2 Измерение яркостной температуры накаливаемых тел

Этот эксперимент покажет, что различные тела, накаливаемые до одинаковой термодинамической температуры, имеют различную яркостную температуру.

1. Направим пирометр на поверхность керамической трубки с кольцами из различных материалов; также как и в предыдущем опыте поставим мощность прогрева на максимум и прогреем трубку до каления.
2. Измерим яркостную температуру поверхности трубки и каждого из колец. На рис. 5 изображены кольца и трубка, где виден контраст яркости колец.



Рис. 5: Фото колец и трубки

$$t_{\text{ТР}} \approx 915^\circ C$$

5.3 Проверка закона Стефана-Больцмана

1. Направим пирометр на нить лампы накаливания.
2. Постепенно увеличивая накал нити лампы, начиная со слабого накала $\sim 900^\circ C$ вплоть до $1900^\circ C$. Будем измерять яркостную температуру через каждые $100^\circ C$, а также записывать падение напряжения и величину тока. Занесем данные в таблицу 1.
3. Для каждого значения яркостной температуры по графику на рис. 1 определим термодинамическую температуру (занесем результат в таблицу 1) и построим график $W = f(T_{\text{терм}})$ на рис. 6
4. Проверим закон Стефана-Больцмана, построим в логарифмическом масштабе функцию $W = \varepsilon_T B T^n$, т.е. функцию

$$\ln W = \ln(\varepsilon_T B) + n \ln T$$

показана на рис. 7

Таблица 1

$T_{\text{ярк}}, \text{ K}$	$T_{\text{терм}}, \text{ K}$	$I, \text{ mA}$	$U, \text{ В}$	$W, \text{ мВт}$
1173	1242	0.70	22.86	16.00
1273	1348	0.76	27.85	21.25
1373	1454	0.80	30.94	24.75
1423	1507	0.83	33.80	27.92
1473	1560	0.87	36.85	32.06
1573	1666	1.02	50.07	51.07
1673	1771	1.07	55.70	59.71
1723	1824	1.13	61.35	69.33
1773	1877	1.19	67.10	79.65
1823	1930	1.27	76.00	96.52
1873	1983	1.31	81.40	106.63
1973	2089	1.41	92.70	130.71
2023	2142	1.47	99.50	146.27
2073	2195	1.53	106.90	163.56
2123	2248	1.61	117.60	189.34
2173	2301	1.67	125.00	208.75

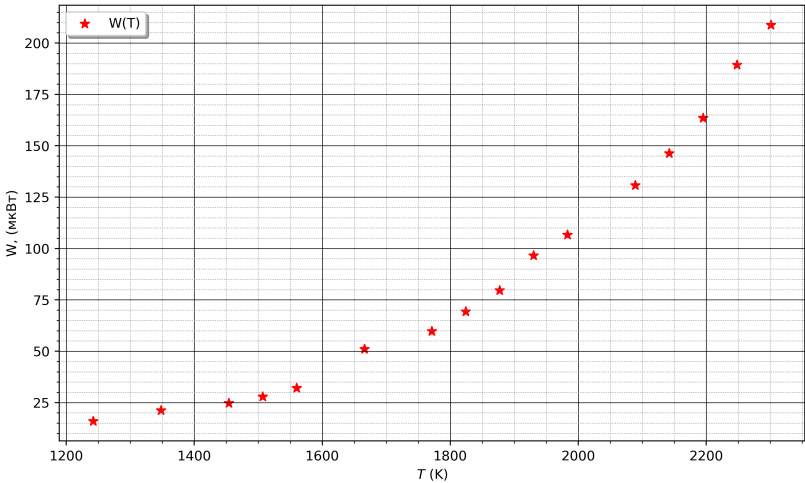


Рис. 6: Зависимость мощности подаваемой на нить от ее термодинамической температуры

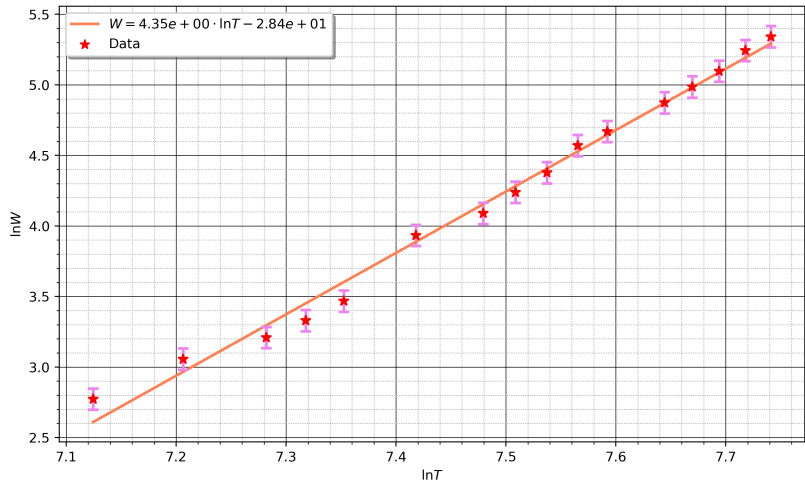


Рис. 7: Зависимость мощности от температуры в логарифмическом масштабе

Откуда получаем значение $n = 4.35 \pm 0.11(2.5\%)$

Сделаем фит этих данных с учетом, что показатель $n = 4$, покажем на рис. 8

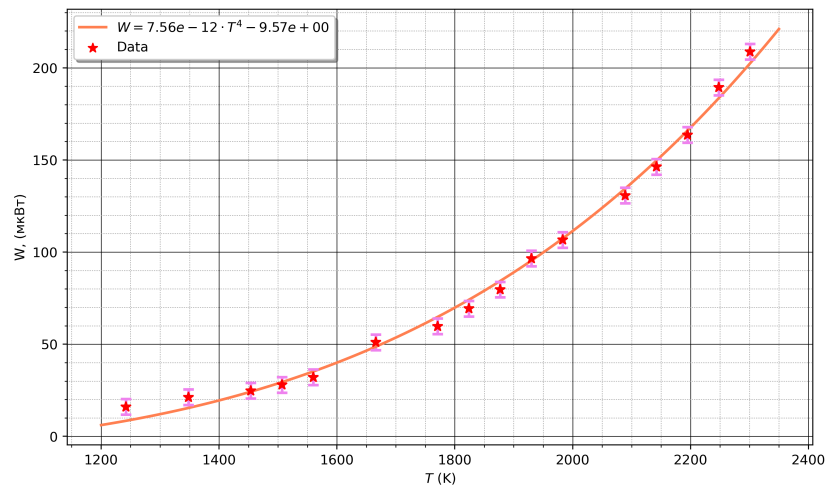


Рис. 8: Фит данных $W(T)$

Откуда $\varepsilon_T S \sigma \approx 7.56 \cdot 10^{-12} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}^4} \right)$

5. Найдем величину постоянной Стефана-Больцмана по формуле:

$$\sigma = \frac{W}{\varepsilon_T S T^4}$$

для каждого измеренного значения и усредним.

$$\sigma = (101.98 \pm 1.44) \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}^4} \right) (\pm 1.4\%)$$

6. По формуле $h = \sqrt[3]{\frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 \sigma}}$ найдем постоянную Планка:

$$h = (252.7 \pm 1.2) \cdot 10^{-35} (\text{Дж} \cdot \text{с}) (\pm 0.5\%)$$

5.4 Измерение яркостной температуры неоновой лампочки

Направим пирометр на неоновую лампочку и измерим пирометром яркостную температуру неоновой лампочки.

$$t \approx 960^\circ \text{C}$$

Однако если дотронемся пальцем до лампы, то обнаружим, что ее термодинамическая температура сильно ниже яркостной. Дело в том, что неоновая лампа совсем не является моделью черного тела и ее излучение носит совсем другую природу - переход электронов между энергетическими уровнями. Цвет - лишь совпадение.

6 Вывод

В ходе работы изучили модели АЧТ и серого тела. Ознакомились с принципами работы пирометра. Выяснилось, что термодинамическая температура может не совсем не совпадать с яркостной. Проверили закон Стефана-Больцмана, на примере вольфрамовой нити вычислили постоянные Планка и Стефана-Больцмана. В работе есть несовпадение теоретических констант с экспериментальными ввиду измерений "на глаз" при сравнении яркости нити накала в пирометре с яркостью объектов исследования.