
Московский Физико-Технический Институт
(государственный университет)

Лабораторная работа по курсу общей физики № 5.8.1

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

Автор:
Филиппенко Павел Б01-009



Долгопрудный, 2022

Цель работы:

- При помощи модели абсолютно чёрного тела проведение измерения температуры оптическим пирометром с исчезающей нитью и термопарой
- Определение постоянных Планка и Стефана-Больцмана

В работе используются:

- оптический пирометр
- модель абсолютно чёрного тела
- вольфрамовая лампа
- неоновая лампа
- блок питания
- цифровые вольтметр и амперметр
- термопара

Теоретическая часть

Для измерения температуры разогретых тел, удалённых 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_{rad} , цветовую T_{col} и яркостную T_{br} .

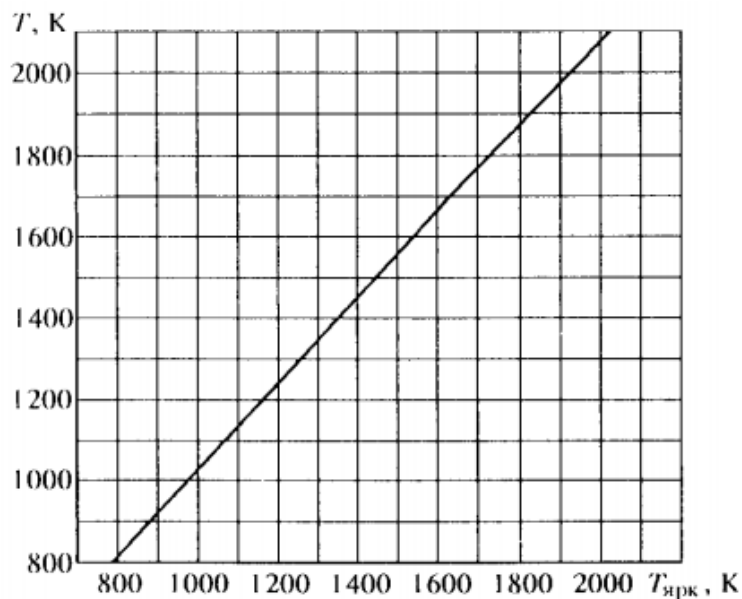
В работе измеряется яркостная температура. **Яркостная температура** - это температура абсолютно чёрного тела, при которой его спектральная испускательная способность равна спектральной испускательной способности исследуемого тела при той же длине волны. Измерение яркостной температуры раскалённого тела 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 термодинамической 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 вольфрамовая нить излучает как серое тел, 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

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

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

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.

Экспериментальная установка

Изучение работы оптического пирометра

В этом пункте предлагается изучить работу электронного пирометра. Для этого направим пирометр на разогретую модель АЧТ и сравним температуры, снятые с помощью термопары (показатель термопары $k = 41 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$) и пирометра.

Температура, полученная с помощью пирометра $T_1 = 1158^\circ\text{C}$

Температура, полученная с помощью термопары $T_2 = 1092^\circ\text{C}$

Таким образом, получаем, что погрешность определения температуры при помощи пирометра составляет около 6%, что не выходит за пределы допустимой нормы.

Измерение яркостной температуры накаливаемых тел

Проверка закона Стефана-Больцмана

Направим пирометр на нить лампы накаливания. Постепенно увеличивая температуру, снимем зависимость яркостной температуры от тока и напряжения, подводимых к лампе. Используя эти величины, найдем подводимую к лампе мощность, а используя рис. 1

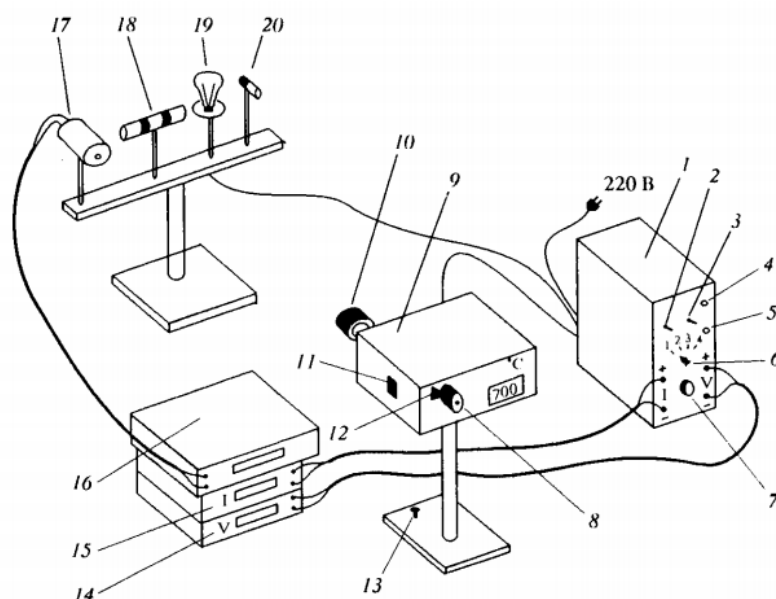


Рис. 2: Схема экспериментальной установки: 1 - блок питания; 2 - тумблер включения питания образцов; 3 - тумблер нагрева нити пирометра; 4 - кнопка "Нагрев нити"; 5 - кнопка "охлаждение нити"; 6 - тумблер переключения образцов; 7 - регулятор мощности нагрева образцов; 8 - окуляр пирометра; 9 - корпус 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

$T_{br}, ^\circ C$	I, A	U, mB	$T, ^\circ C$	W, mBt	$\varepsilon_W \cdot 10^{-5}$
950	$1,5 \pm 0,1$	$19,84 \pm 0,01$	$962,50 \pm 1$	29,760	51,46
1000	$1,5 \pm 0,1$	$21,50 \pm 0,01$	$1\ 016,67 \pm 1$	32,250	47,54
1100	$1,5 \pm 0,1$	$26,40 \pm 0,01$	$1\ 125,00 \pm 1$	39,600	38,91
1200	$1,5 \pm 0,1$	$30,31 \pm 0,01$	$1\ 233,33 \pm 1$	45,465	33,97
1300	$1,5 \pm 0,1$	$40,08 \pm 0,01$	$1\ 341,67 \pm 1$	60,120	26,04
1400	$1,5 \pm 0,1$	$50,39 \pm 0,01$	$1\ 450,00 \pm 1$	75,585	21,01
1500	$1,5 \pm 0,1$	$63,51 \pm 0,01$	$1\ 558,33 \pm 1$	95,265	17,00
1600	$1,5 \pm 0,1$	$69,48 \pm 0,01$	$1\ 666,67 \pm 1$	104,220	15,59
1700	$1,5 \pm 0,1$	$81,35 \pm 0,01$	$1\ 775,00 \pm 1$	122,025	13,52
1800	$1,5 \pm 0,1$	$86,65 \pm 0,01$	$1\ 883,33 \pm 1$	129,975	12,70
1900	$1,5 \pm 0,1$	$89,25 \pm 0,01$	$1\ 991,67 \pm 1$	133,875	12,28

Таблица 1: Экспериментальные данные

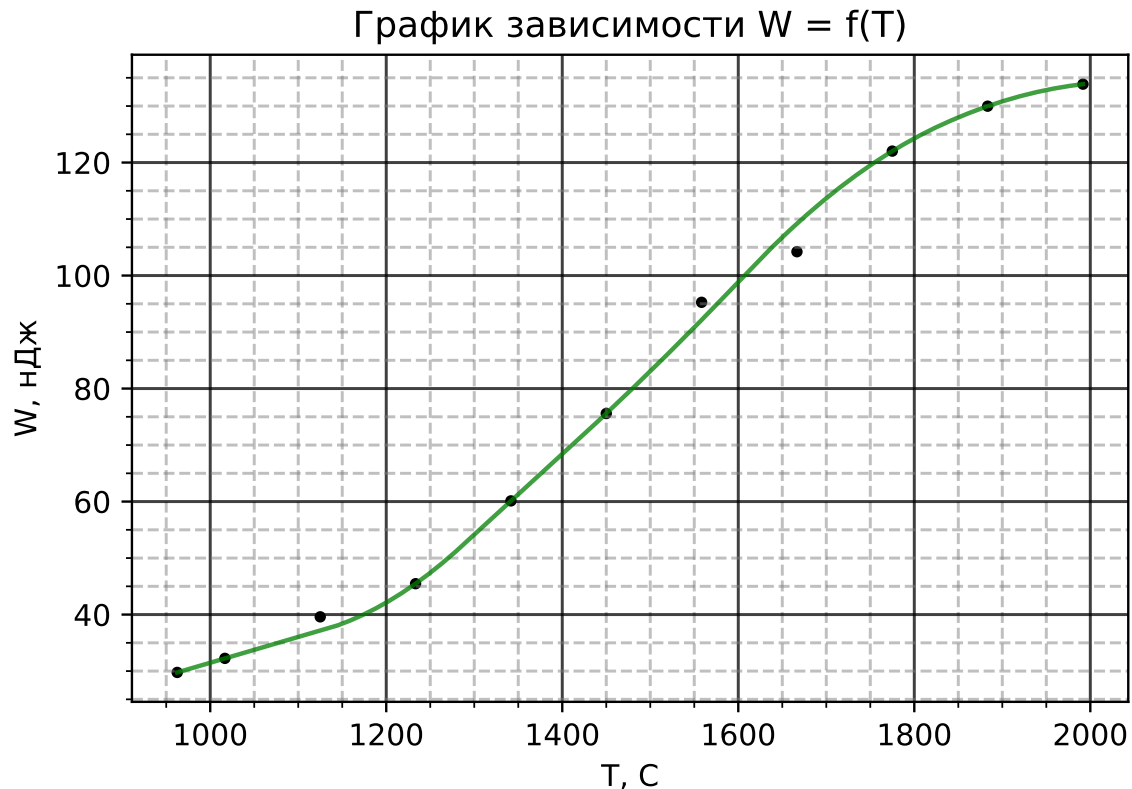
каждому значению яркостной температуры сопоставим значение термодинамической температуры. Результаты запишем в таблицу 1.

По измеренным данным построим график зависимости $W = f(T)$.

Для проверки закона Стефана-Больцмана

$$W = \varepsilon_T B T^n$$

построим данный график в логарифмическом масштабе, при этом мы получим функцию



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

после чего сможем определить значение n по наклону графика.

Как видно, наилучшее приближение к теоретическому значению $n = 4$ можно получить, если рассматривать среднюю часть графика.

Используя табличное значение ε_T для вольфрама, найдем постоянную Стефана-Больцмана σ ($B = S\sigma$, где $S = 0.36 \text{ см}^2$ – эффективная площадь излучающей поверхности нити).

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

Рассчитаем погрешность для коэффициента Стефана-Больцмана по правилу расчета косвенной погрешности.

$$\varepsilon_\sigma = \sqrt{\varepsilon_W^2 + 4\varepsilon_T^2}$$

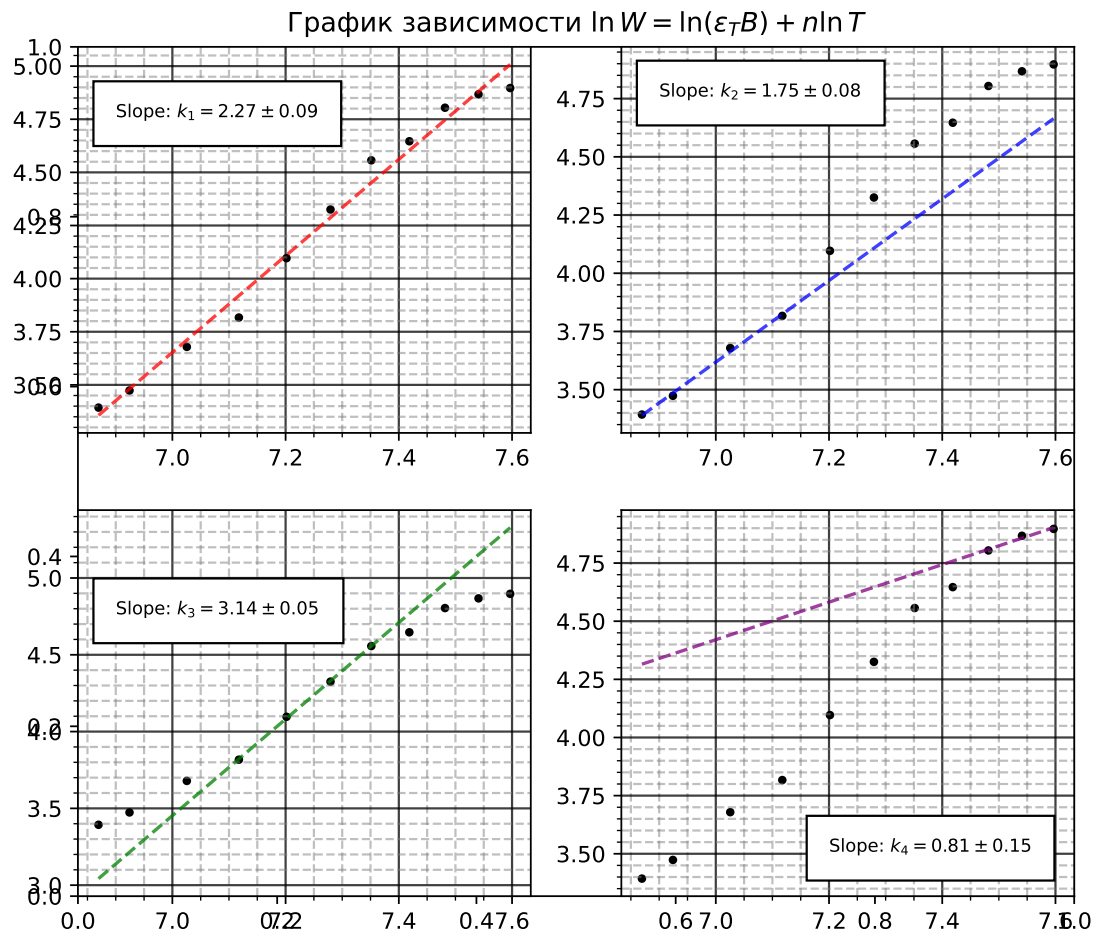
при этом

$$\varepsilon_W = \sqrt{\varepsilon_U^2 + \varepsilon_I^2}$$

Получаем расчет погрешности ε_σ (для одной температуры)

$$\varepsilon_\sigma = \sqrt{\varepsilon_U^2 + \varepsilon_I^2 + 4\varepsilon_T^2}$$

Заметим, что погрешность мощности пренебрежимо мала по сравнению с погрешностью температуры, (10^{-5} по сравнению с 10^{-3}) поэтому при расчетах данное слагаемое было исключено.



Поскольку в качестве итогового значения σ мы берем среднее значения по всем температурам, необходимо вычислить погрешность среднего арифметического (здесь считаем, что $\bar{\sigma}$ – среднее значение).

$$err = \sqrt{\frac{\sum(\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n(n-1)}}$$

$$\sigma = (1.9 \pm 0.24) \cdot 10^{-9} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{K}^4}$$

По найденным значениям σ посчитаем постоянную планка h , используя формулу

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

Погрешность h :

$$\varepsilon_h = \frac{1}{3} \sqrt[3]{\frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2}} \varepsilon_\sigma$$

$$\sigma_h = \frac{1}{3} \sqrt[3]{\frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2}} \varepsilon_\sigma h$$

T, C	T, K	ε_T	$W, \text{мВт}$	$\sigma \cdot 10^{-9} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{K}^4}$	$\text{err } \sigma \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{K}^4}$
962,50	$1235,50 \pm 1$	0,105	29,76	3,38	5,47
1016,67	$1289,67 \pm 1$	0,105	32,25	3,08	4,47
1125,00	$1398,00 \pm 1$	0,119	39,60	2,42	3,46
1233,33	$1506,33 \pm 1$	0,133	45,46	1,84	2,45
1341,67	$1614,67 \pm 1$	0,144	60,12	1,71	2,11
1450,00	$1723,00 \pm 1$	0,164	75,58	1,45	1,69
1558,33	$1831,33 \pm 1$	0,179	95,26	1,31	1,44
1666,67	$1939,67 \pm 1$	0,195	104,22	1,05	1,08
1775,00	$2048,00 \pm 1$	0,209	122,03	0,92	0,90

Таблица 2

$$h = 2.05 \cdot 10^{-33} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Измерение «яркостной температуры» неоновой лампы

Термодинамическая температура неоновой лампочки примерно равна комнатной, и не соответствует её яркостной температуре ($\approx 820^\circ\text{C}$). Дело в том, что неоновая лампочка в принципе не является моделью абсолютно чёрного или серого тела, и её излучение носит совершенно другую природу (переход электронов между энергетическими уровнями). То, что её свет имеет такой же цвет, что и нагретое АЧТ - совпадение.