

Работа 8.1

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

Подлесный Артём
группа 827

6 декабря 2020 г.

Экспериментальная установка

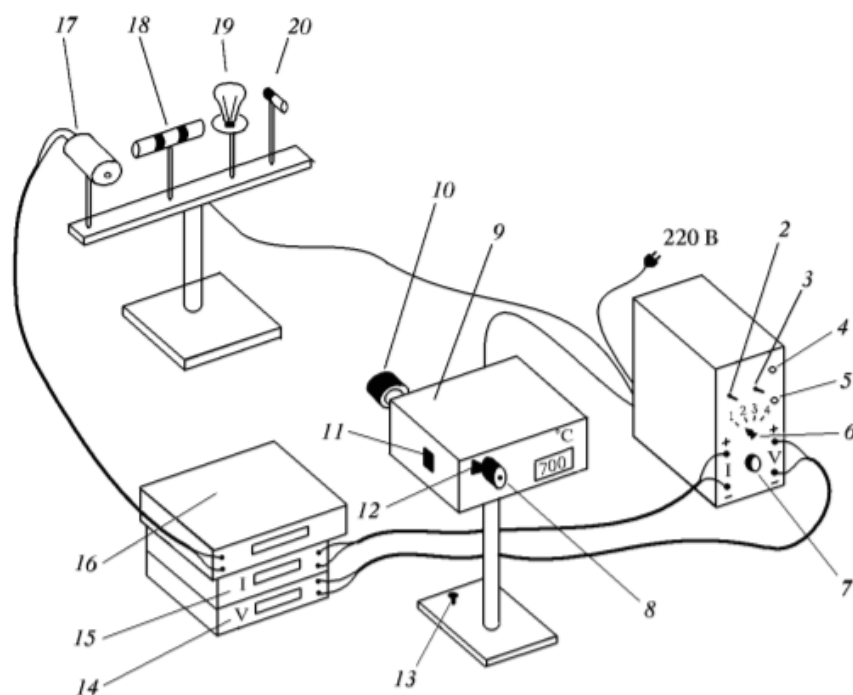


Рис. 1: Схема установки для исследования закона излучения АЧТ и серых тел. Исследуются 4 образца, пронумерованные с 17 по 20: модель АЧТ, трубка с кольцами из разных материалов, лампа накаливания и неоновая лампочка.

С помощью пирометра измеряется яркостная температура тела – температура, при которой абсолютно черное тело (АЧТ) излучает с той же спектральной испускательной способностью что и исследуемое тело, при той же длине волны.

Измерение производится с помощью пирометра с пропадающей нитью. Пирометр показывает яркостную температуру нити, и для начала работы было необходимо проверить, что это действительно температура АЧТ. С помощью модели 1 образца, это было проделано с помощью термопары и формулы баланса потребляемой и излучаемой энергии:

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

Для температуры в 20°C , полученная температура АЧТ совпадало с температурой пирометра, так что в дальнейшем им действительно можно пользоваться.

Измерение яркостной температуры тел

В этом пункте работы исследуется второй образец. Он представляет из себя керамическую трубку с двумя надетыми на неё кольцами из разных материалов. Трубка была нагрета до яркостной температуры в 917°C . Одновременно с этим можно было измерить яркостную температуру колец, качественно, лишь примерно из-за сложности в получении результатов. Они составили:

$$T_{\text{ярк}} = 818 \parallel 812^\circ\text{C}, \text{ для 1 и 2 колец соответственно.}$$

Разница в температурах объясняется различным коэффициентом излучения (ε_T) для разных материалов. Закон Стефана-Больцмана для серых тел выражается формулой

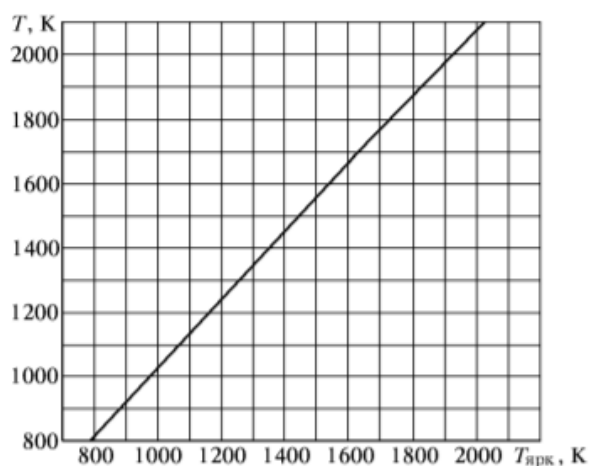
$$R_T = \varepsilon_T \sigma T^4. \quad (1)$$

Тогда для 2 разных материалов коэффициенты будут разные, а значит при одинаковой температуре они излучают по-разному, а значит яркостная температура будет различаться.

Эксперимент понятен, но в данной установке, из-за наличия дневного света, практически невозможно увидеть цвет излучения на белой трубке и блестящих кольцах, не то что увидеть разницу в их яркости. Так что установку я бы серьезно переработал, иначе весь эксперимент просто подгоняется на ранее известный результат, никакой беспристрастной проверки просто не происходит. Ситуацию мог бы улучшить красный фильтр на 6500 Å, но при такой температуре свечения через фильтр практически не видно, так что на нашей установке его нельзя было использовать.

Проверка закона Стефана-Больцмана

На этом этапе работы проверяется закон Стефана-Больцмана для серого тела – вольфрамовой нити 3 образца. С помощью пирометра измеряется яркостная температура нити $T_{\text{ярк}}$, с шагом в 100 градусов, в зависимости от мощности, потребляемой лампой, которая оценивается с помощью напряжения, показываемого вольтметром, и силы тока на амперметре. Далее с помощью графика зависимости температуры вольфрама $T(T_{\text{ярк}})$, рис. 2(а), получаем зависимость $T(W)$, представленная на таблице 1.



(а)

T, K	$\epsilon_{\lambda, T} (\lambda = 6500 \text{\AA})$	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

(б)

Рис. 2: а) График зависимости температуры вольфрама от его яркостной температуры $T(T_{\text{ярк}})$. б) Таблица коэффициентов излучения вольфрама в зависимости от температуры.

По полученным данным можно построить график в логарифмическом масштабе, используя следующую формулу:

$$\ln W = \ln \epsilon_T B + n \ln T, \quad (2)$$

где $B = \sigma \cdot S$ – эффективная площадь излучающей поверхности. Естественно эти значения зависят от температуры нити - нить излучает по всей поверхности при температуре более 1700К, однако в логарифмическом масштабе эти изменения можно не учитывать.

Из графика (рис.3) получаем значение для степени в законе Стефана-Больцмана (1):

$$n = 4.1 \pm 0.1.$$

$T_{\text{ярк}}, \text{C}$	U, B	I, A	T, K	$W, \text{Bт}$
1000	1.955	0.51	1443	0.997
1100	2.348	0.55	1551	1.291
1200	2.718	0.585	1659	1.590
1300	3.268	0.629	1767	2.056
1400	4.016	0.696	1875	2.795
1500	5.011	0.774	1984	3.879
1600	6.256	0.864	2092	5.405
1700	6.233	0.863	2200	5.379
1600	5.243	0.792	2092	4.152
1500	4.729	0.752	1984	3.556
1800	7.199	0.928	2308	6.681
1900	8.218	0.92	2416	7.561
1900	8.718	1.024	2416	8.927

Таблица 1: Экспериментальные данные зависимости $T(W)$. Здесь есть несколько значений для одной и той же температуры, что связано с тем, что на глаз определять, когда "исчезает" нить пирометра – очень сложно, и порой носит случайный характер. При построении графика будет понятно, какие результаты более достоверные. Но с учетом того, каким образом дали зависимость $T(T_{\text{ярк}})$ понятно отношение к точности в этой работе.

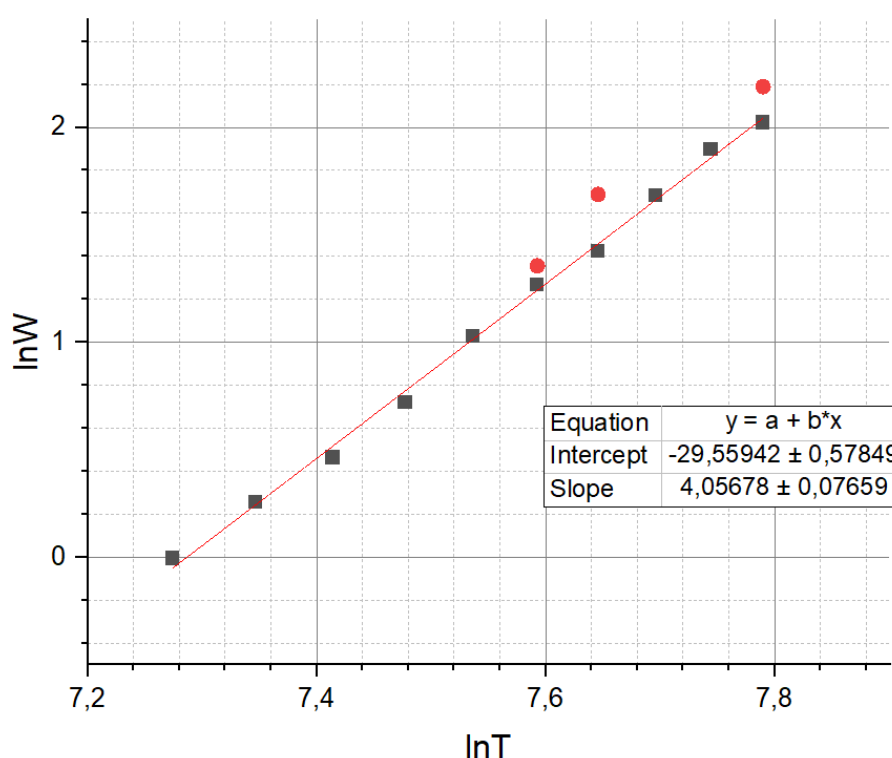


Рис. 3: Закон Стефана-Больцмана в логарифмическом масштабе (2). Точки, которые были перемеряны при выполнении эксперимента, отмечены на графике красным. Видно, что они действительно являются недостоверными.

Определения постоянных Стефана-Больцмана и Планка

При температуре нити больше 1700K вся нить равномерно накалена, а значит можно количественно определить величину постоянной Стефана-Больцмана:

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

где $S = 0.36 \text{ см}^2$. По полученным значениям была оценена постоянная Планка по следующей формуле:

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

Результаты оценки представлены на таблице 2.

$T, \text{ K}$	ε_T	$W, \text{ Вт}$	$\sigma, \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{ K}^4$	$h, \text{ кг} \cdot \text{ м}^2 \cdot \text{ с}^{-1} \cdot 10^{34}$
1767	0.22	2.06	5.27E-12	6.79
1875	0.23	2.80	5.07E-12	6.88
1984	0.25	3.56	4.68E-12	7.07
2092	0.26	4.15	4.03E-12	7.42
2200	0.28	5.38	3.93E-12	7.49
2308	0.29	6.68	3.72E-12	7.62
2416	0.31	7.56	3.26E-12	7.97

Таблица 2: Постоянные Стефана-Больцмана и Планка, измеренные при разных температурах для равномерно накаленной нити.

Видно, что значения для постоянных различаются при разной температуре. Табличные значения постоянных:

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{ K}^4},$$

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{ м}^2 \cdot \text{ с}^{-1}.$$

Как видно, результаты совпадают с табличными значениями только по порядку. Это закономерный результат, о причинах расхождения будет сказано в выводе.

Измерение яркостной температуры неоновой лампочки

Последний этап работы проводится на 4 образце - неоновой лампочке. Её яркостная температура была оценена как 953° . При этом ее реальная температура была комнатной. Этот факт можно объяснить тем, что неон является принципиально другим источником света - газоразрядным.

Атомы инертного газа возбуждаются под действием поданного напряжения, но находиться в этом состоянии долго не могут. Поэтому через короткий промежуток времени, исчисляемый миллионными долями секунды, электрон с резонансного уровня возвращается в нейтральное положение.

При обратном переходе электрона с резонансного уровня в нейтральное положение происходит излучение энергии в виде определённой порции света, кванта света - фотона.

Вывод

В работе исследовался закон Стефана-Больцмана, и он подтвердился с достаточно хорошей сходимостью и достоверностью. Однако количественные оценки оказались крайне неточными, и сильно различались при разной температуре. Это можно объяснить несколькими факторами. Первый – теоретический, состоит в особенности вольфрама в виде селективности излучения – на коротких волнах интенсивность видимого излучения существенно больше, чем следует из закона для серого тела. В частности поэтому экспериментальные значения постоянных ухудшались по мере увеличения температуры.

Однако в данной работе более существенным является факт общей неточности постановки эксперимента. Очень сложно получить четкий момент исчезновения нити, и результаты будут сильно искажены особенностью цветосприятия глаза, так что реальную погрешность метода даже сложно оценить. При этом данные для обработки даются в виде странного графика, где нет точных значений коэффициентов прямой (рис.2 а), и таблицы с определенными коэффициентами излучения, не теми, которые измеряются в самой работе. В таких условиях не получается провести ничего кроме оценочной работы с большими погрешностями, что я и сделал.