

В этой задаче требуется оценка погрешностей.

Теоретическая справка

Электромагнитное излучение – совокупность электромагнитных волн разных длин волн. Интенсивность каждой из таких волн различна. Зависимость интенсивности волн в электромагнитном излучении от длины волны называется спектром излучения. Человеческий глаз воспринимает только те электромагнитные волны, длины которых лежат в некотором диапазоне, называемом оптическим. Нагретые тела излучают электромагнитные волны. Спектр излучения таких тел зависит от температуры тела (Рис.1). Человеческий глаз воспринимает излучение лишь сильно нагретых тел, так как спектр излучения таких тел частично попадает в оптический диапазон. Изменение температуры сильно нагретого тела глаз воспринимает, как небольшое изменение цвета свечения.

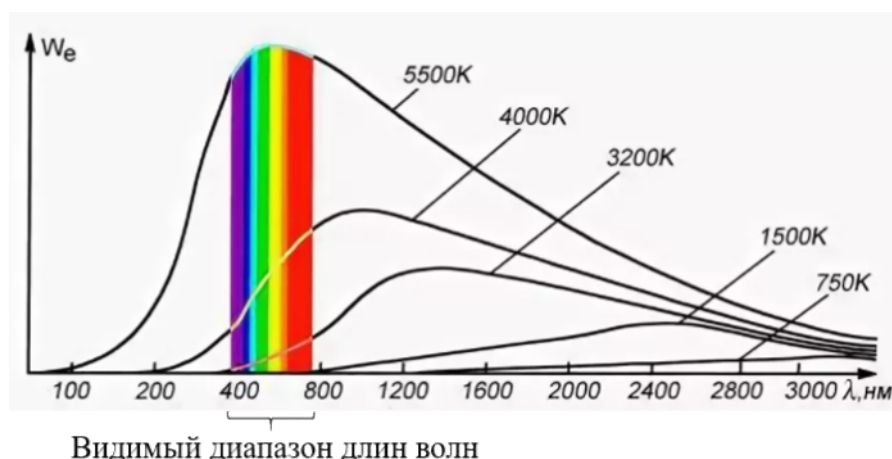


Рис. 1: Спектр излучения АЧТ при разных температурах.

Абсолютно чёрное тело (далее – АЧТ) – физическое тело, которое при любой температуре поглощает всё падающее на него электромагнитное излучение. В нашей задаче будем считать, что спираль лампы накаливания является АЧТ.

Энергетической светимостью w назовем количество полной электромагнитной энергии всех длин волн, которое излучается телом за единицу времени с единицы площади. Закон Стефана-Больцмана устанавливает связь энергетической светимости и температуры тела T для АЧТ:

$$w = \sigma T^4, \quad (1)$$

σ – некоторая постоянная величина. Температура T измеряется по абсолютной шкале температур (в Кельвинах). Для пересчета температуры из шкалы Цельсия в шкалу Кельвина можно воспользоваться простой формулой:

$$T = T_C + 273.15, \quad (2)$$



где T - температура в градусах Кельвина, T_C - температура в градусах Цельсия.

Для лампы накаливания при больших температурах можно считать, что вся потребляемая ею электрическая мощность W выделяется в виде излучения. То есть для нее электрическая мощность равна произведению светимости и площади поверхности спирали накаливания.

Температурный коэффициент сопротивления (далее – ТКС) при температуре T_0 – величина, характеризующая относительное изменение $\frac{\Delta R}{R_0}$ электрического сопротивления участка электрической цепи при изменении температуры на $\Delta T = 1$ К:

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{\Delta R}{\Delta T}, \quad (3)$$

R_0 – сопротивление участка цепи при температуре T_0 . Зная сопротивление R проводника и используя его ТКС, можно вычислить температуру проводника:

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0(T - T_0)}. \quad (4)$$

$$T = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} + T_0. \quad (5)$$

Будем считать, что формула (5) верна для всего исследуемого в задаче диапазона температур. ТКС вольфрамовой нити накаливания является известной величиной:

$$\alpha = 4.8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

Проверка выполнимости закона Стефана-Больцмана для лампы накаливания

Задание.

1. Измерьте с помощью мультиметра сопротивление спирали R_0 при комнатной температуре. Сопротивление припаянных к лампе проводов считайте бесконечно малым.
2. Измерьте вольт-амперную характеристику (далее – ВАХ) лампочки накаливания. Для каждой пары значений тока I и напряжения U рассчитайте электрическую мощность W , вырабатываемую на спирали и температуру спирали T в градусах Кельвина.
3. Используя результаты проведённых измерений, проверьте, выполняется ли формула (1) для спирали лампочки. Постройте линеаризованный график зависимости $W(T)$ (без использования логарифмирования).



Таблица 1: Внутреннее сопротивление амперметра (мультиметр MASTECH M838).

Режим амперметра	r , Ом
2000 μA	101.0 ± 0.3
20 mA	10.5 ± 0.3
200 mA	1.5 ± 0.3
10 A	менее 0.3

Оборудование. Мультиметр, лампочка накаливания, соединительные провода, лабораторный источник питания.

Примечание.

1. Комнатную температуру примите равной $T_0 = 295$ K.
2. **Напряжение**, подаваемое на лампу, **не должно превышать 15 В**. Сила тока, протекающего через мультиметр в режиме амперметра, **не должна превышать 230 мА**. Иначе эти элементы станут неработоспособными.
3. В случае выхода из строя мультиметра замена может быть произведена только один раз. В случае выхода из строя лампы накаливания замена не предусмотрена.
4. Амперметр, которым оснащён блок питания, имеет высокую погрешность. Вместо него используйте мультиметр. Показаниям встроенного в блок питания вольтметра можно доверять (погрешность: ± 0.1 В).
5. Внутреннее сопротивление r амперметра приведено в Таблице 1.
6. Для регулировки напряжения на блоке питания используются две ручки – «COARSE» (грубая настройка) и «FINE» (точная настройка). При вращении ручек по часовой стрелке напряжение будет увеличиваться.

Измерение термодинамической температуры.

Задание.

Используя термопару и мультиметр, проведите прямое измерение температуры T_1 пламени свечи.

Оборудование. Свеча с подставкой из стакана и гайки, мультиметр с термопарой, зажигалка.



Измерение яркостной температуры.

В этом и следующем упражнении считайте, что спираль лампы является АЧТ.

Яркостная температура (далее – ЯТ) – фотометрическая величина, характеризующая светимость источника света. По определению, яркостная температура в некотором диапазоне длин волн – это такая температура, которую имело бы АЧТ, обладающее такой же светимостью в данном диапазоне длин волн. В нашей задаче будем называть яркостной температурой свечи такую температуру спирали лампы, при которой средняя светимость в видимом световом диапазоне у лампы совпадает с средней светимостью пламени свечи.

Задание.

1. Придумайте установку, позволяющую измерить среднюю ЯТ пламени свечи.
2. Проведите необходимые измерения и определите среднюю ЯТ T_2 пламени свечи.

Оборудование. Лабораторный блок питания, лампа накаливания, мультиметр, соединительные провода с зажимами «крокодил», свеча с подставкой из стакана и гайки, штатив с лапкой, лупа.

Измерение цветовой температуры.

При разных температурах АЧТ имеет разный спектр излучения. Спектральный состав излучения АЧТ позволяет однозначно определить его температуру (Рис. 1).

Для характеристики оптического излучения часто используется такой параметр как *цветовая температура*. Цветовая температура излучения (далее – ЦТ) – это температура АЧТ, при которой спектральный состав излучения АЧТ близок (или совпадает) с спектральным составом характеризуемого излучения. Обычно, параметр ЦТ применяется как характеристика работы энергосберегающих и светодиодных ламп (Рис. 2). Близость спектрального состава излучения двух источников света воспринимается глазом человека как близость оттенков излучения.

Задание.

1. Придумайте установку, позволяющую оценить ЦТ излучения пламени свечи.
2. Проведите необходимые измерения и определите ЦТ T_3 излучения пламени свечи.

Оборудование. Лабораторный блок питания, лампа накаливания, мультиметр, соединительные провода с зажимами «крокодил», свеча с подставкой из стакана и гайки, штатив с лапкой.

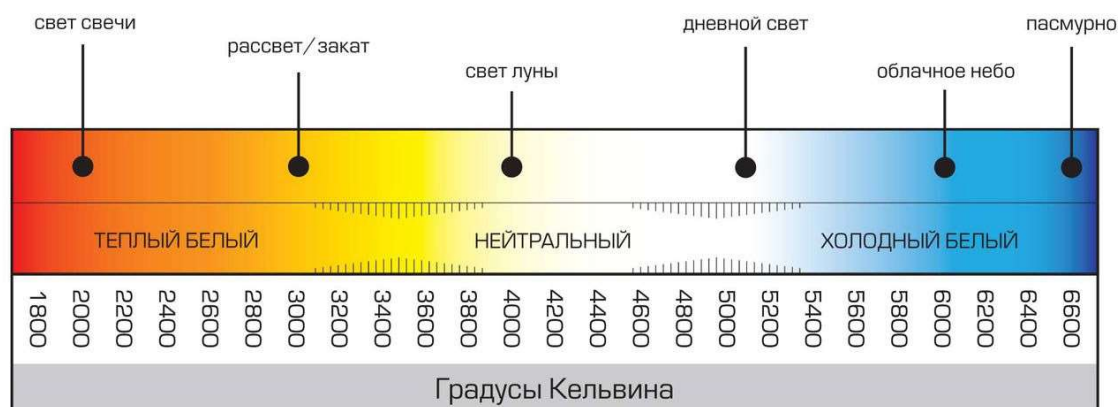


Рис. 2: Приблизительная шкала цветовой температуры.

*Решение***Проверка выполнимости закона Стефана-Больцмана для лампы накаливания**

Для измерения ВАХ лампочки соберём схему, изображённую на Рис. 3.

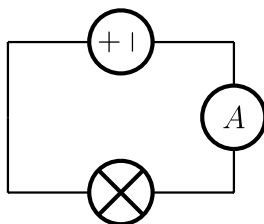


Рис. 3: Схема для измерения ВАХ лампы.

В измерениях будем использовать вольтметр, встроенный в блок питания. В таком случае нужно учитывать, что напряжение на блоке питания и лампочке отличаются ввиду наличия у амперметра внутреннего сопротивления r . Кроме того, имеет место падение напряжения на соединительных проводах. Для расчёта напряжения U на лампе будем использовать следующую формулу:

$$U = U_0 - I(r + r_p), \quad (6)$$

U_0 – показания вольтметра на блоке питания, I – сила тока, протекающего через мультиметр (амперметр), r_p – сопротивление проводов.

Используя омметр, измерим сопротивление R_0 спирали лампы при комнатной температуре T_0 . Результат измерения:

$$\tilde{R} = 7.1 \pm 0.2 \text{ Ом.}$$

Сопротивление щупов мультиметра:

$$R_{meas} = 0.4 \pm 0.2 \text{ Ом.}$$

Сопротивление лампы:

$$R_0 = 6.7 \pm 0.3 \text{ Ом.}$$

Измерим ВАХ лампочки. Сопротивление проводов в контрольном эксперименте (вместе с щупами амперметра):

$$r_p = 0.5 \pm 0.2 \text{ Ом.}$$



Измерения силы тока будем проводить в режиме мультиметра «200 mA». Для каждой пары значений тока I и напряжения U рассчитаем потребляемую мощность W , сопротивление спирали R и температуру спирали T .

Результаты измерений и вычислений представлены в Таблице 2.

Таблица 2: Результаты измерений и вычислений.

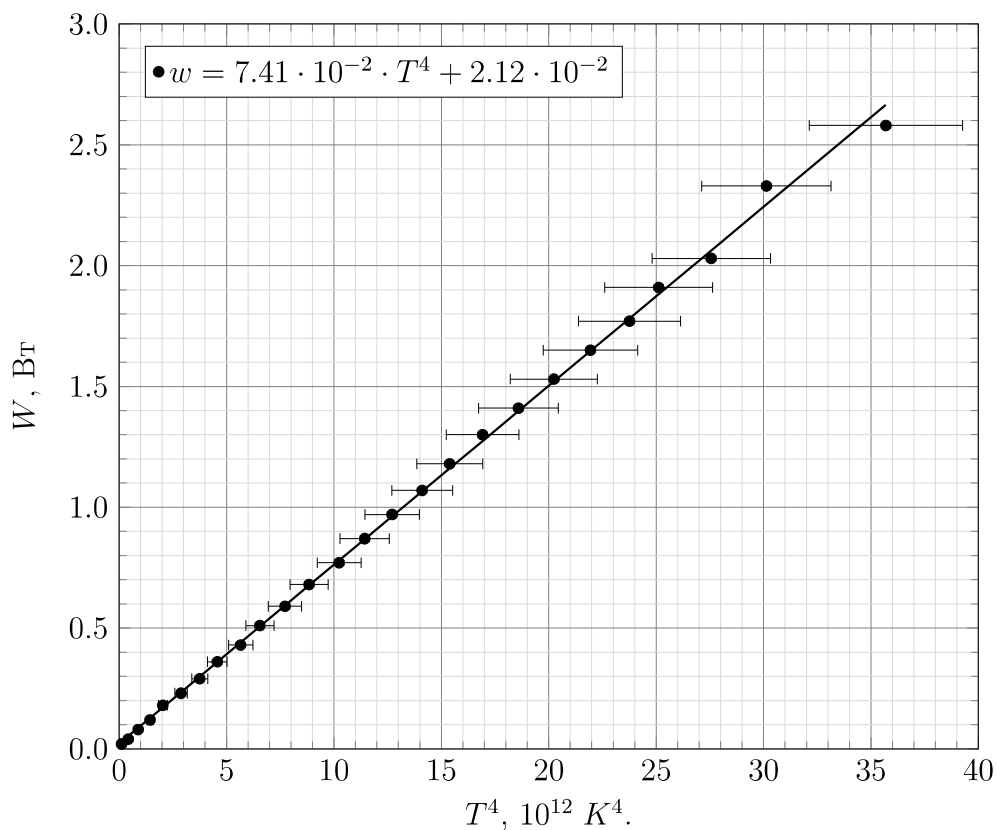
U_0 , В	U , В	I , мА	R , Ом	W , Вт	T , 10^3 К	T^4 , 10^{12} К ⁴
0.59	0.5	32.9	15.81	0.02	0.58	0.11
1.09	1.0	43.1	23.20	0.04	0.81	0.42
1.61	1.5	52.7	28.46	0.08	0.97	0.88
2.12	2.0	61.5	32.52	0.12	1.10	1.44
2.64	2.5	70.0	35.71	0.18	1.20	2.04
3.15	3.0	76.6	39.16	0.23	1.30	2.88
3.67	3.5	83.3	42.02	0.29	1.39	3.75
4.18	4.0	90.3	44.30	0.36	1.46	4.57
4.69	4.5	96.0	46.88	0.43	1.54	5.66
5.21	5.0	102.6	48.73	0.51	1.60	6.55
5.72	5.5	108.1	50.88	0.59	1.67	7.72
6.23	6.0	113.8	52.72	0.68	1.72	8.84
6.74	6.5	118.6	54.81	0.77	1.79	10.24
7.25	7.0	124.1	56.41	0.87	1.84	11.43
7.76	7.5	129.3	58.00	0.97	1.89	12.71
8.27	8.0	134.2	59.61	1.07	1.94	14.11
8.78	8.5	139.4	60.98	1.18	1.98	15.39
9.29	9.0	144.0	62.50	1.30	2.03	16.92
9.80	9.5	148.3	64.06	1.41	2.08	18.59
10.31	10.0	152.7	65.49	1.53	2.12	20.24
10.81	10.5	157.0	66.88	1.65	2.16	21.94
11.32	11.0	161.1	68.28	1.77	2.21	23.76
11.83	11.5	166.0	69.28	1.91	2.24	25.12
12.34	12.0	169.1	70.96	2.03	2.29	27.56
13.36	13.0	179.0	72.63	2.33	2.34	30.13
14.37	14.0	184.5	75.88	2.58	2.44	35.69

Если закон Стефана-Больцмана выполняется для исследуемой лампочки, график зависимости W от T^4 должен быть линейным. Проведём необходимые вычисления и построим график зависимости W от T^4 (Рис. 4).

Видно, что график хорошо аппроксимируется прямой. Это подтверждает гипотезу о применимости закона Стефана-Больцмана в рассматриваемом случае.

Измерение термодинамической температуры.

Используя термопару и мультиметр проведём прямое измерение средней температуры пламени свечи. Для этого внесём термопару в пламя свечи и зафиксируем показания

Рис. 4: График зависимости W от T^4 .

мультиметра.

$$T_1 = 890 \pm 10 \text{ } ^0C.$$

Измерение яркостной температуры.

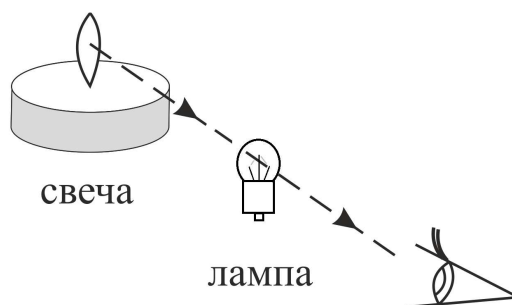


Рис. 5: Схема установки.

Метод измерения средней ЯТ пламени основан на подборе режима работы лампы накаливания, при котором светимость спирали лампы будет близка к светимости характеризуемого источника (пламени свечи). С прикладной точки зрения это означает, что по восприятию глазами свет лампы накаливания и свет пламени свети должны совпадать



по яркости. При этом измеряется сопротивление спирали лампы. Указанное в условиях задачи значение ТКС спирали лампы позволяет вычислить температуру спирали лампы, а значит, оценить яркостную температуру пламени.

Для измерения сопротивления спирали будем использовать ту же схему, что и в предыдущем упражнении. С помощью мультиметра и вольтметра на блоке питания будем измерять ток и напряжение на лампе. Зажжём свечу. На фоне пламени свечи расположим лампочку накаливания. В потоке света от свечи будем наблюдать нить накаливания лампочки. Подадим на лампочку некоторое напряжение. В случае, если температура нити отличается от ЯТ пламени, яркость свечения спирали будет отличаться от яркости пламени свечи. Так, если нить накаливания будет иметь температуру меньше ЯТ пламени, она будет восприниматься как темная полоска на фоне пламени свечи. Если нить накаливания будет иметь температуру большую, чем ЯТ пламени свечи, то нить будет восприниматься как яркая полоска на фоне пламени. В случае, когда температура спирали близка или совпадает с ЯТ пламени, нить лампы практически не будет видна на фоне пламени. Для более детального рассмотрения нити на фоне пламени можно воспользоваться лупой.

Подберем режим работы лампы накаливания, при котором будет достигнут описанный оптический эффект. Зафиксируем показания приборов – значения силы тока и напряжения на лампочке. Далее изменим установленный ток, текущий через лампу, (лучше в меньшую сторону, чтобы не ослепить себя) и повторим эксперимент. Для повышения точности эксперимент лучше провести несколько раз. Результаты измерений приведены в Таблице 3.

Таблица 3: Результаты измерений и вычислений.

U , В	I , мА	R , Ом	T , $^{\circ}\text{C}$
4.15	92.0	45.1	1216
4.43	95.6	46.3	1254
4.37	94.7	46.1	1248
4.40	95.0	46.3	1253
4.34	94.6	45.9	1240

Расчётное значение средней ЯТ пламени свечи:

$$T_2 = 1243 \pm 14 \text{ } ^{\circ}\text{C}.$$

Измерение цветовой температуры.

Метод измерения средней ЦТ пламени основан на подборе режима работы лампы накаливания, при котором спектр оптического излучения лампы будет близок по форме к спектру излучения характеризуемого источника. С прикладной точки зрения это означает,



что по восприятию глазами свет лампы накаливания и свет пламени свечи должны быть близки по оттенку. При совпадении ЦТ источников измеряется сопротивление спирали лампы. Указанное в условии задачи значение ТКС спирали лампы позволяет вычислить температуру спирали лампы, а значит, оценить цветовую температуру пламени.

Для измерения сопротивления спирали будем использовать ту же экспериментальную установку, что и в предыдущем упражнении. Дополнительно можно разместить лупу между лампочкой и пламенем, увеличив наблюдаемое изображение пламени (это может повысить удобство работы, но на результаты не повлияет).

В потоке света от свечи будем наблюдать нить накаливания лампочки. Подадим на лампочку некоторое напряжение. В случае, если температура нити отличается от температуры пламени, цвет (оттенок) светящейся спирали будет отличаться. В случае, когда температура спирали близка или совпадает с ЦТ пламени, нить лампы будет совпадать по оттенку с изображением пламени свечи.

Подберем режим работы лампы накаливания, при котором будет достигнут описанный оптический эффект. Зафиксируем показания приборов. Далее изменим ток, текущий через лампу, (лучше в меньшую сторону, чтобы не ослепить себя) и повторим эксперимент. Для повышения точности проведем эксперимент несколько раз. Результаты измерений приведены в Таблице 4.

Стоит отметить, что для подбора одинакового оттенка свечения лампы и свечи не обязательно ставить лампу на линии наблюдения пламени свечи. С той же точностью можно получить значения ЦТ, расположив эти источники света рядом с друг другом. Выбор конфигурации установки зависит от предпочтений измеряющего человека.

Таблица 4: Результаты измерений и вычислений.

U , В	I , мА	R , Ом	T , $^{\circ}\text{C}$
7.65	120.0	63.8	1796
8.08	120.0	67.3	1907
8.24	130.0	63.4	1785
7.71	120.0	64.3	1811
7.40	120.0	61.7	1731

Расчётное значение средней ЦТ пламени свечи:

$$T_3 = 1806 \pm 57^{\circ}\text{C}.$$