

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5.8.1

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

Автор работы: Хоружий Кирилл

От: 15 сентября 2021 г.

Цель работы

1. В рамках модели абсолютно черного тела (АЧТ), с помощью пирометра и термопары, исследовать тепловое излучение накаливаемых тел с различной испускательной способностью.
2. Определить постоянные Планка и Стефана-Больцмана.

Оборудование

Пирометр с исчезающей нитью, термопара, лампа накаливания, АЧТ, блок питания, два цифровых вольтметра.

Основные формулы

Закон Стефана-Больцмана:

$$W = \epsilon_T S \sigma T^4.$$

Выражение для постоянной Стефана-Больцмана:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2}.$$

Экспериментальная установка

Описание 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.

Описание образцов. В работе исследуются:

- *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.
- *Керамическая трубка с набором колец из различных материалов*, нагреваемая изнутри нихромовой спиралью. Материалы колец имеют различную излучательную способность.
- *Вольфрамовая нить электрической лампочки.*

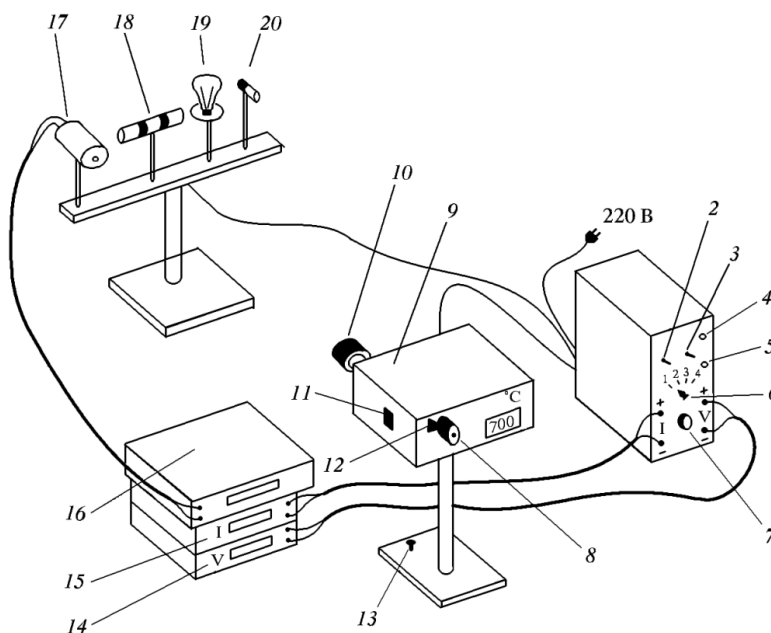


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Измерения

Изучение работы пирометра. Нагрев АЧТ до красного каления (дождавшись стабилизации температуры, судя по показаниям термопары), с помощью пирометра измерим температуру t_{pyr} , сравним её с температурой, полученной по термопаре¹ t_{therm} :

$$t_{\text{therm}}(45.89\text{мВ}) = 1150 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad t_{\text{pyr}} = [1137, 1140, 1144, 1155] \text{ }^{\circ}\text{C} = [0.989, 0.991, 0.995, 1.004]t_{\text{therm}}.$$

Ошибка не превышает 2%, так что показаниям пирометра, по крайней мере для АЧТ в этом диапазоне можно верить.

Изучение яркостной температуры накаливаемых тел. Источником нагреваем керамическую трубку с кольцами из различных материалов. Пирометром измерили² яркостную температуру поверхности трубки t_{surf} и каждого из колец $t_{\text{ring}}^{(1)}$, $t_{\text{ring}}^{(2)}$:

$$t_{\text{surf}} = (850 \pm 10) \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad t_{\text{ring}}^{(1)} \approx 794 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad t_{\text{ring}}^{(2)} \approx 710 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Несовпадение яркостной температуры обусловлено зависимостью мощности излучения от спектрального коэффициента поглощения, которой, видимо, различен для различных материалов второго образца.

Проверка закона Стефана-Больцмана. Теперь источником нагревается вольфрамовая нить лампы накаливания. С помощью пирометра измерялась яркостная температура нити t_{thr} (в самом ярком месте). Параллельно снимались значения цифровыми мультиметрами снимались значения тока I и напряжения U на онной. Результаты можно найти в таблице №1.

Таблица 1: Измерение яркостной температуры вольфрамовой нити, как функции мощности

| U , В | I , А | N , Вт | ΔN , Вт | t , $^{\circ}\text{C}$ | Δt , $^{\circ}\text{C}$ |
|---------|---------|----------|-----------------|--------------------------|---------------------------------|
| 1.65 | 0.481 | 0.79 | 0.02 | 866 | 35 |
| 1.74 | 0.491 | 0.85 | 0.02 | 900 | 37 |
| 2.24 | 0.540 | 1.21 | 0.02 | 1000 | 40 |
| 2.57 | 0.572 | 1.47 | 0.03 | 1100 | 43 |
| 3.31 | 0.638 | 2.11 | 0.04 | 1200 | 46 |
| 3.29 | 0.635 | 2.09 | 0.04 | 1300 | 49 |
| 4.00 | 0.696 | 2.78 | 0.06 | 1400 | 52 |
| 4.74 | 0.754 | 3.57 | 0.07 | 1450 | 53 |
| 4.84 | 0.759 | 3.67 | 0.07 | 1500 | 55 |
| 4.59 | 0.742 | 3.41 | 0.07 | 1500 | 55 |
| 5.32 | 0.798 | 4.25 | 0.08 | 1600 | 58 |
| 6.13 | 0.857 | 5.25 | 0.11 | 1688 | 60 |
| 5.86 | 0.837 | 4.90 | 0.10 | 1700 | 61 |
| 7.00 | 0.915 | 6.40 | 0.13 | 1792 | 63 |
| 7.72 | 0.963 | 7.43 | 0.15 | 1800 | 64 |
| 7.51 | 0.949 | 7.13 | 0.14 | 1833 | 64 |
| 9.22 | 1.053 | 9.71 | 0.19 | 1900 | 67 |

Погрешность измерения пирометра на основе предыдущих измерений была положена $\sim 3\% \pm 10$, для мультиметров взят $\sim 1\%$ от показаний.

Измерение яркостной температуры неоновой лампочки. Включив неоновую лампочку, пирометром измерим её яркостную температуру t_{Ne} :

$$t_{\text{Ne}} = (874 \pm 27) \text{ }^{\circ}\text{C},$$

что, очевидно $\gg 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Ну, так совпало, что переход электронов между энергетическими уровнями неона имеет длину волны схожую, с излучением АЧТ на измеренной температуре.

¹Коэффициент перевода: 25.07 $^{\circ}\text{C}/\text{мВ}$.

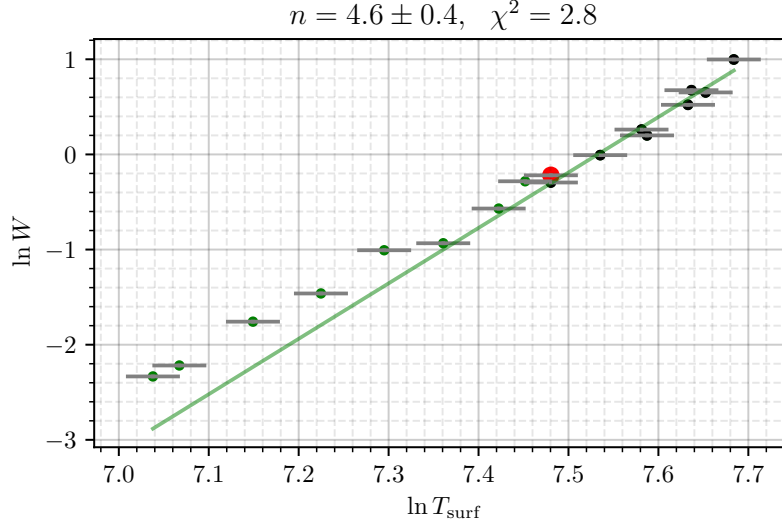
²Измерения проводились несколько раз, что и обеспечило оценку погрешности каждого из измерений.

Обработка данных

В логарифмическом масштабе построим $\ln(U \times I)[\ln(t_{\text{surf}})]$. Начиная с температуры $t_{\text{surf}} \sim 1500$ °C (красная точка на графике) вольфрамовая нить светилась почти полностью, начиная с этой температуры приближаем из соображений

$$UI = W = \varepsilon_T B T^n, \quad \Rightarrow \quad \ln W = \ln(\varepsilon_T B) + n \ln(T).$$

Лабораторный практикум предлагает игнорировать зависимость $\varepsilon_T(t_{\text{surf}})$, однако это вносит достаточно существенные изменения, поэтому данные из таблицы лабораторного пракикума (таблица №1, стр. 236) восстановили зависимость $\varepsilon_T(T)$.

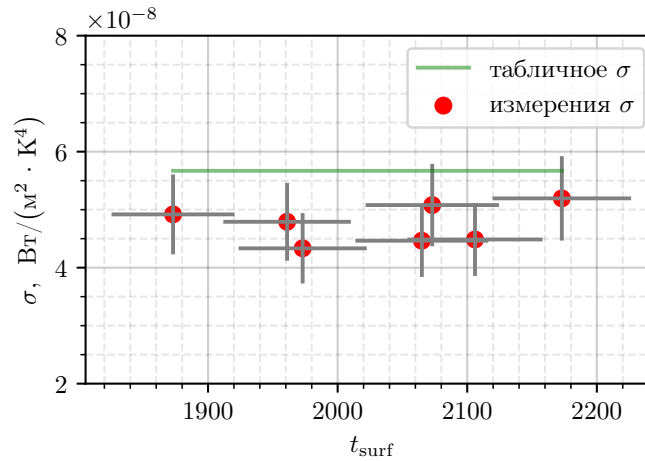


Значения $\chi^2 = 2.8$ говорит об адекватности приближения в рамках данной погрешности. Итого, находим значение для n

$$n = 4.8 \pm 0.4,$$

что, учетом погрешности, сходится с ожиданиями.

Теперь определим постоянную Стефана-Больцмана. Основной вклад в погрешность даёт температура в силу T^4 . Также наблюдается постоянный сдвиг, скорее всего связанный с неточностью указанной $S = 0.36$ см², измерить которую не представляется возможным (значение лучше сходится с табличным при $S = 0.27$ см²).



Результаты

Постоянная Стефана-Больцмана. Табличное значение постоянной Стефана-Больцмана $\sigma_{\text{table}} = 5.7 \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ Т}^4)$. Полученное значение составило

$$\sigma_{\text{meas}} = (4.8 \pm 0.7) \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ Т}^4),$$

что, с учётом погрешности, чуть ниже табличного значения, что скорее всего объясняется некорректным значением S .

Постоянная Планка. Благодаря кубическому корню, чуть лучше обстоят дела с постоянной Планка:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2}, \quad \Rightarrow \quad h = \sqrt[3]{\frac{2\pi^5 k^4}{15\sigma}} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{c}}, \quad \Rightarrow \quad h_{\text{meas}} = (7.0 \pm 0.4) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с},$$

что, кстати, замечательно сходится³ с табличным значением $h_{\text{table}} = 6.6 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Выводы

С помощью пирометра исследована яркостная температура нагретых тел с различной излучательной способностью. Определено значение постоянной Стефана-Больцмана

$$\sigma_{\text{meas}} = (4.8 \pm 0.7) \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ Т}^4),$$

и постоянной Планка

$$h_{\text{meas}} = (7.0 \pm 0.4) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с},$$

что частично совпадает с табличными значениями в пределах погрешности.

Измерение постоянной Стефана-Больцмана проблематично для измерения в силу зависимости от T^{-4} , которая сама по себе определяется с большой неточностью. Также в рамках этой работы не представляется возможным определить площадь, с которой происходит излучение, от чего эксперимент носит скорее наблюдательный характер.

³Сыграло округление вверх погрешности.