

Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Лабораторная работа по квантовой физике

Тепловое излучение [8.1]

Талашкевич Даниил Александрович
Группа Б01-008

Долгопрудный
2022

Содержание

1	Аннотация	1
2	Теоретические положения	1
3	Экспериментальная установка	2
4	Ход работы	3
4.1	Изучение работы оптического пирометра	3
4.2	Измерение яркостной температуры накали́нных тел	3
4.3	Проверка закона Стефана-Больцмана	3
4.4	Измерение яркостной температуры неоновой лампочки	5
5	Вывод	5

1 Аннотация

Цель работы: При помощи модели абсолютно чёрного тела проведение измерения температуры оптическим пирометром с исчезающей нитью и термопарой; Исследование излучение накаливаемых тел с различной испускательной способностью; Определение постоянных Планка и Стефана-Больцмана

В работе используются: оптический пирометр, модель абсолютно чёрного тела, образцы колец, вольфрамовая лампа, неоновая лампа, блок питания, цифровые вольтметры

2 Теоретические положения

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} .

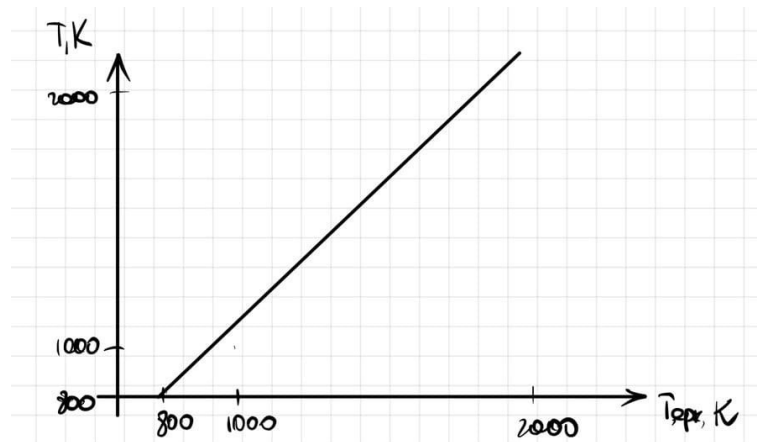
В работе измеряется яркостная температура. **Яркостная температура** - это температура абсолютно чёрного тела, при которой его спектральная испускательная способность равна спектральной испускательной способности исследуемого тела при той же длине волны. Измерение яркостной температуры раскалённого тела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

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

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

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

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.

3 Экспериментальная установка

Исследуемые в работе образцы:

- **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**

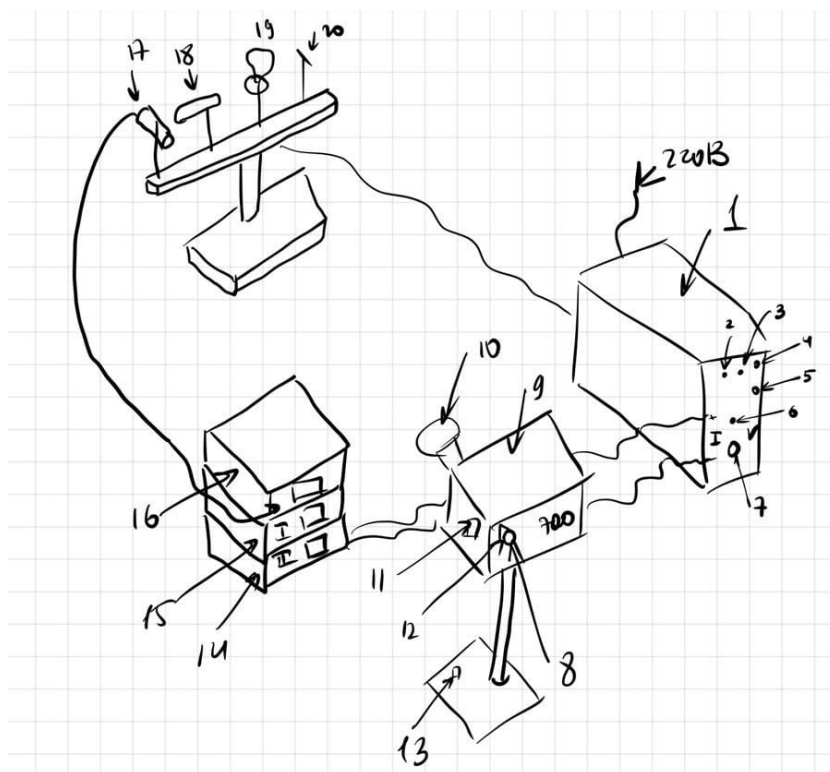


Рис. 2: Схема экспериментальной установки: 1 - блок питания; 2 - тумблер включения питания образцов; 3 - тумблер нагрева нити пирометра; 4 - кнопка "Нагрев нити"; 5 - кнопка "охлаждение нити"; 6 - тумблер переключения образцов; 7 - регулятор мощности нагрева образцов; 8 - окуляр пирометра; 9 - корпус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

4 Ход работы

4.1 Изучение работы оптического пирометра

Цель пункта: помощью пирометра измеряется температура модели АЧТ и проводится сравнение её значения со значением температуры, измеренной при помощи термопарного термометра.

1. Настроим пирометр, прогреем его нить. Прогреем модель АЧТ.

2. Введём красный светофильтр пирометра. Изменяя ток через нить пирометра, добьёмся исчезновения нити на фоне изображения раскалённой поверхности дна АЧТ.

Таблица 1: Сравнение температур АЧТ, выдаваемое пирометром и измеренное термопарой

$T, ^\circ C$ (убывание)	936	936	931	934	$\langle T \rangle, ^\circ C$	934 ± 5
$T, ^\circ C$ (возрастание)	928	927	931	933	$\langle T \rangle, ^\circ C$	930 ± 5
$V, \text{ мВ}$	37,41				$T_{\text{термопара}}, ^\circ C$	938 ± 2

Из таблицы следует, что пирометр проградуирован по АЧТ точно в пределах погрешностей измерений.

4.2 Измерение яркостной температуры накаливаемых тел

При нагревании керамической трубки с помощью пирометра зафиксировано, что различные кольца обладают различными яркостными температурами вследствие различия спектральных светимостей. Яркостные температуры тел измерить не удалось из-за того, что свечения колец оказалось достаточно слабым (невозможно определить, одинаковы ли яркости нити и кольца).

4.3 Проверка закона Стефана-Больцмана

Нагреем лампу накаливания до тёмно-красного свечения, а затем будем увеличивать её температуру, снимая значения силы тока и напряжения на лампе. Измеренная яркостная температура преобразуется в термодинамическую температуру с помощью графика зависимости $T(T_{\text{ярк}})$.

Закон Стефана-Больцмана в случае вольфрамовой лампы накаливания для проверки имеет вид

$$W = \varepsilon_T S \sigma T^n \Rightarrow \ln W = \ln(\varepsilon_T S \sigma) + n \ln T, \quad (3)$$

или

$$\ln W - \ln(\varepsilon_T S \sigma) = n \ln T, \quad (4)$$

где $\varepsilon_T = \varepsilon_T(T)$, зависимость представлена в виде таблицы для различных температур вольфрама, а $S = 5 \text{ см}^2$ – площадь поверхностей нитей накаливания.

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. 3: Таблица коэффициентов ε_T для вольфрама

$T_{\text{ярк}}, ^\circ C$	T, K	$V, \text{ мВ}$	I, A	$W, \text{ мВт}$
857.00	1135.18	58.14	1.077	62.62
942.00	1227.91	79.2	1.277	101.14
1024.00	1317.36	105.65	1.491	157.52
1082.00	1380.63	129.84	1.662	215.79
808.00	1081.73	46.14	0.952	43.93
839.00	1115.55	52.05	1.016	52.88
893.00	1174.45	66.43	1.159	76.99
919.00	1202.82	69.23	1.202	83.21
996.00	1286.82	93.78	1.396	130.92
1059.00	1355.54	128.85	1.663	214.28

Таблица 2: Измеренные значения для лампы накаливания (вольфрам)

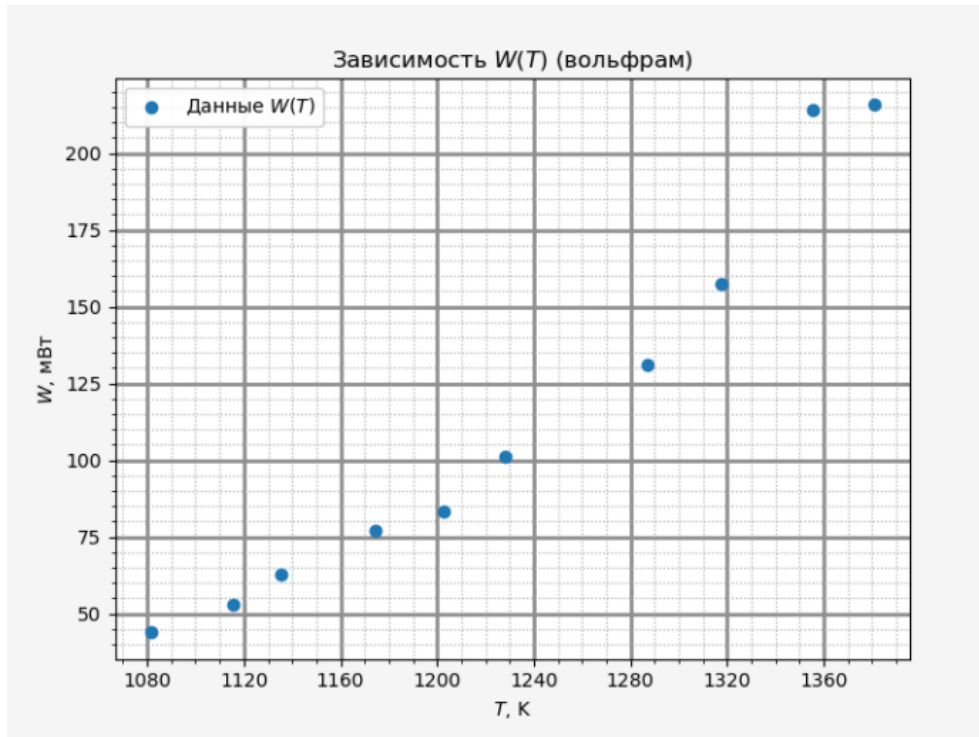
Построим таблицу измеренных значений.

С помощью МНК измерим коэффициент из логарифмического графика $W(T)$:

$$n = 4.34, \Delta n = 0.29, R^2 = 0.991$$

Полученное значение в рамках погрешностей сходится с теоретическим значением, равным 4 (закон Стефана-Больцмана).

С учётом того, что для лампы накаливания $S = 5 \text{ см}^2$, посчитаем для 3 различных температур ($T = 1174.45 \text{ K}, T = 1380.63 \text{ K}, T = 1081.73 \text{ K}$) в

Рис. 4: График зависимости $W(T)$

рамках всего температурного диапазона значения постоянной Стефана-Больцмана (значения ε_T посчитаны из таблицы):

$$\sigma_1 = (5.31 \pm 0.21) \cdot 10^{-9} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^{-4}$$

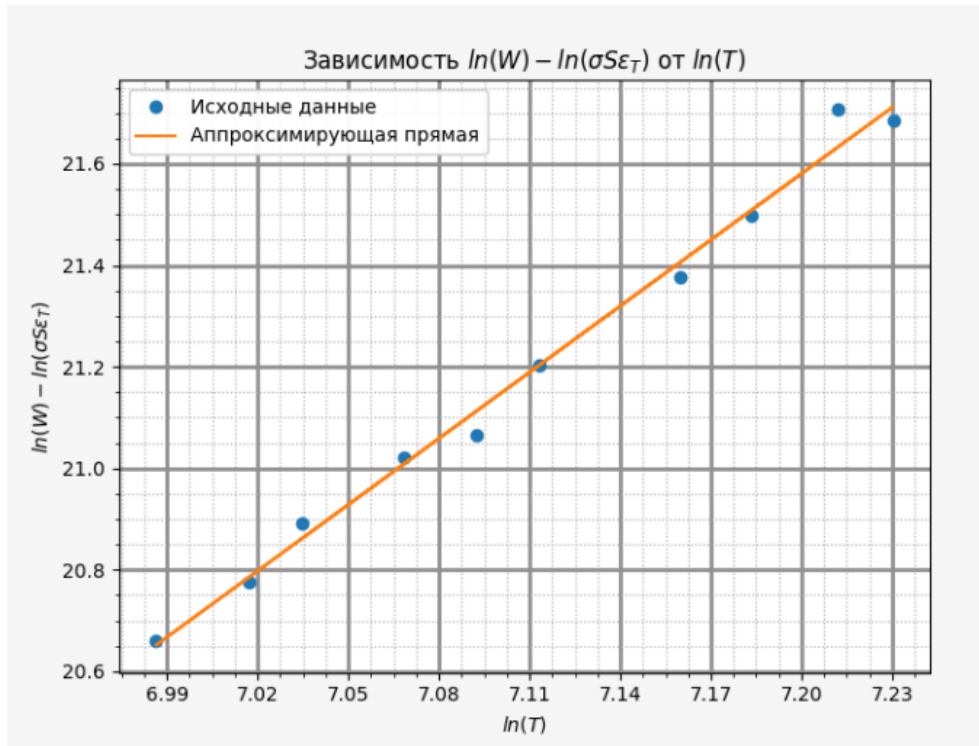
$$\sigma_2 = (6.33 \pm 0.17) \cdot 10^{-9} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^{-4}$$

$$\sigma_3 = (7.24 \pm 0.15) \cdot 10^{-9} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^{-4}$$

Полученные значения на порядок отличаются от теоретического значения постоянной Стефана-Больцмана.

4.4 Измерение яркостной температуры неоновой лампочки

Термодинамическая температура неоновой лампочки примерно равна комнатной и не соответствует её яркостной температуре ($T_{\text{якр}} \approx 828^\circ\text{C}$). 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).

Рис. 5: График зависимости $W(T)$ в логарифмических осях

Неоновая лампа имеет похожую спектральную светимость при заданной длине волны $\lambda = 650$ нм, хотя её температура совсем не соответствует яркостной.

5 Вывод

В результате работы проверена градуировка пирометра по АЧТ – при значении, измеренном термопарой $(938 \pm 2)^\circ\text{C}$, получены значения термодинамической температуры при убывании яркостной температуры во время измерений $(934 \pm 5)^\circ\text{C}$ и при возрастании $(930 \pm 5)^\circ\text{C}$. То есть значения, измеренные по пирометру, в рамках погрешностей совпадают со значением, измеренным термопарой.

Для двух колец, изготовленных из различных материалов, зафиксировано различие яркостных температур при $\lambda = 650$ нм при одинаковых термодинамических температурах, т.к. различные материалы могут иметь различные зависимости спектральной светимости от длины волны.

Подтверждена температурная зависимость закона Стефана-Больцмана

для лампы накаливания (вольфрам) с результатами степени

$$W \propto T^n, n = 4.34, \Delta n = 0.29, n_{th} = 4.$$

Во всём диапазоне измерений найдены постоянные Стефана-Больцмана для 3 различных температур $T = 1174.45 \text{ K}$, $T = 1380.63 \text{ K}$, $T = 1081.73 \text{ K}$:

$$\sigma_1 = (5.31 \pm 0.21) \cdot 10^{-9} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^{-4}$$

$$\sigma_2 = (6.33 \pm 0.17) \cdot 10^{-9} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^{-4}$$

$$\sigma_3 = (7.24 \pm 0.15) \cdot 10^{-9} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^{-4}$$

Полученные значения отличаются на порядок от теоретического $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^{-4}$. Причины расхождения возможны из-за неверно заданной площади поверхности нитей лампы накаливания $S = 5 \text{ см}^2$ (которая не влияет на поиск температурной зависимости $W(T)$), также возможны расхождения из-за того, что в расчётах не учитываются потери на рассеивание тепла в окружающую среду (воздух).

Для неоновой лампы измерена яркостная температура $T_{\text{якр}} \approx 828^\circ\text{C}$ и проверено, что её термодинамическая температура отличается от яркостной и примерно равна комнатной.

Список литературы

- [1] Игошин Ф.Ф., Самарский Ю.А., Ципенюк Ю.М. *Лабораторный практикум по общей физике: Учеб. пособие для вузов. Т. 3 Квантовая физика*. М.: Физматкнига, 2005.