

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа прикладной математики и информатики

Отчёт о выполнении лабораторной работы

8.1

Тепловое излучение

Соболевский Федор Александрович
Б05-111

Октябрь 2023

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.

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

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

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. Зная её значение, можно определить значение постоянной Планка по следующей формуле:

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

Схема установки

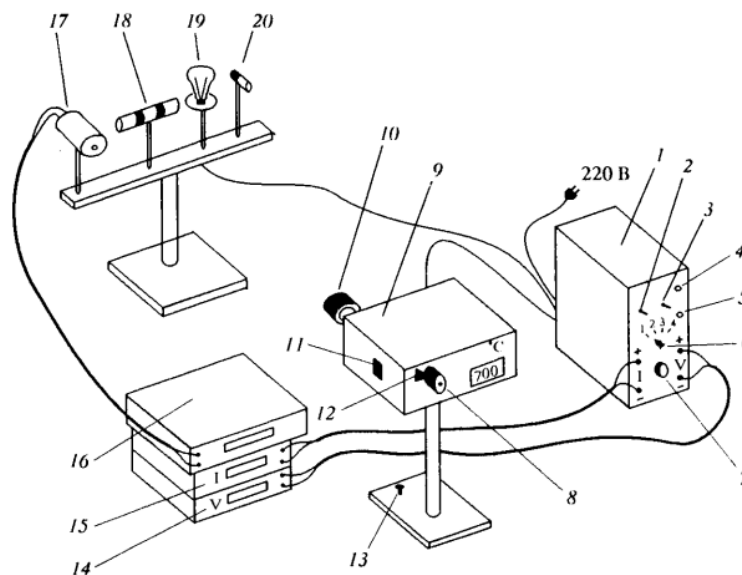


Рис. 1: Схема установки

Экспериментальная установка состоит из оптического пирометра, модели АЧТ, образцов с общим блоком питания, а также вольтметра и амперметра для измерения тока вольфрамовой нити. Оптический пирометр с исчезающей нитью представляет собой зрительную трубу, в плоскости изображения которой находится накаливающаяся проволока. Глядя через встроенный монохроматор предполагается установить температуру проволоки такой, чтобы ее свет был «таким же» как свет тела, т.е. их яркостная испускательная способность сравнялась, и нить исчезла на фоне объекта. Так как прибор проградуирован по АЧТ, на экране пирометра будет отображаться яркостная температура объекта.

В качестве модели АЧТ используется керамическая трубка, нагреваемая нихромовой проволокой. Ее температура измеряется хромель-алюминиевой термопарой, подключенной к вольтметру, и позволяющей определить разность комнатной температуры с температурой АЧТ.

В качестве одного из образцов используется вольфрамовая нить лампы накаливания. Напряжение и сила тока через нее измеряются непосредственно соответствующими приборами, что даёт возможность определить ее потребляемую и излучаемую мощность. Другой образец — керамическая трубка с кольцами из различных материалов, нагреваемая до сравнительно однородной температуры единой нихромовой нитью. Последним изучаемым образцом является неоновая лампа.

Результаты измерений и обработка данных

Изучение работы оптического пирометра

С помощью пирометра и при помощи термопарного термометра измерена температура модели АЧТ. Проверим корректность измерений: температура на пирометре не должна сильно отличаться от температуры АЧТ, измеренной термопарой. Температура, измеренная пирометром, составила $t = 1062^{\circ}\text{C}$, измеренная при помощи термопары — $t = 1060^{\circ}\text{C}$. Разница составляет менее 0,2%, что позволяет нам утверждать, что измерения при помощи пирометра достаточно достоверны.

Измерение яркостной температуры тел

Качественно проверено, что разные тела, накалинные до одинаковой термодинамической температуры, могут иметь различную яркостную температуру. Для этого несколько образцов из разных материалов было нагрето до одинаковых термодинамических температур. Яркостная температура поверхности образцов – трубки и колец – оказалась примерно следующей:

- Керамическая трубка: 750-800 °C;
- Металлические кольца: ≈ 750 °C;
- Неметаллические кольца < 700 °C (не определяется пирометром).

Несовпадение яркостной температуры у различных тел, имеющих одинаковую термодинамическую температуру, возникает из-за того, что эти две величины связаны, в том числе, через спектральный коэффициент поглощения, который у разных материалов различный.

Проверка закона Стефана-Больцмана

В диапазоне 900-1900 °C измерена яркостная температура нити лампы накаливания, а также значение силы тока и напряжения на ней. Определим также по значениям яркостной температуры нити её термодинамическую температуру, используя рис. 3. По рис. 4 определяется поправка ε_T , соответствующая каждому значению T . Результаты измерений занесём в таблицу 1.

I , мА	0,622	0,701	0,755	0,850	0,936	0,990	1,043	1,163	1,237	1,367
U , В	19,25	25,61	30,14	38,77	46,98	52,38	57,51	70,90	79,73	95,48
$T_{\text{ярк}}$, °C	945	1055	1150	1250	1350	1450	1550	1650	1750	1850
T , °C	960	1080	1195	1295	1400	1500	1610	1725	1830	1940
P лампы, мВт	11,97	17,95	22,76	32,95	43,97	51,86	59,98	82,46	98,63	130,52

Таблица 1: Зависимость мощности, выделяемой на лампе, от температуры нити накала

Представим зависимость $W = f(T)$ в логарифмическом масштабе как $\ln(W) = \ln(\varepsilon_T \sigma S) + n \ln(T)$. График данной зависимости представлен на рис. 2. По углу наклона графика можно определить показатель степени температуры в законе Стефана-Больцмана. Его экспериментальное значение равно $n = 3,98 \pm 0,26$, где коэффициент наклона и ошибка измерения получены по методу наименьших квадратов. Теоретическое значение $n = 4$ совпадает с экспериментальным в пределах погрешности.

Найдем величину постоянной Стефана-Больцмана для каждого измеренного значения T , превышающего 1700 К, по формуле

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

Результаты представлены в таблице 2.

T , К	1773	1883	1998	2103	2213
ε_T	0,219	0,235	0,253	0,259	0,285
σ , 10^{-12} Вт/(см ² · К ⁴)	6,67	5,63	5,69	5,21	5,29

Таблица 2: Зависимость постоянной Стефана-Больцмана от термодинамической температуры

Усреднением получим значение $\sigma = 5,70 \pm 0,25$. Здесь погрешность складывается из среднеквадратичного отклонения при усреднении и измерительной погрешности. Полученное значение практически совпадает с теоретическим $\sigma_{th} = 5,67 \cdot 10^{-12}$ Вт/(см² · К⁴).

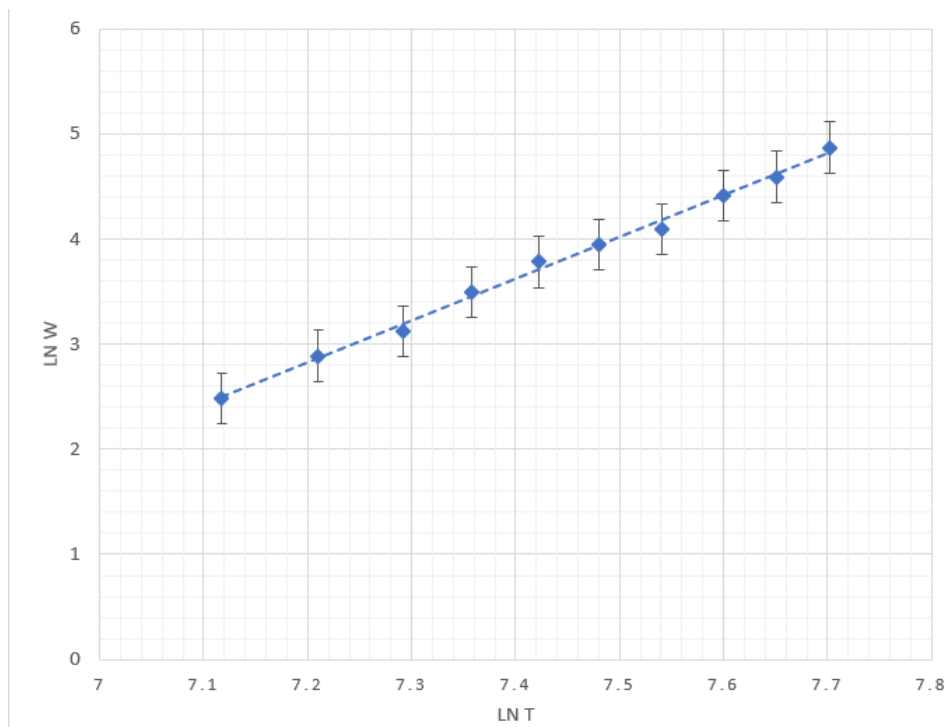


Рис. 2: Зависимость мощности излучения от температуры в логарифмическом масштабе

Оценим значение постоянной Планка:

$$h = \sqrt[3]{\frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2\sigma}} = (6,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Измерение яркостной температуры неоновой лампочки

Термодинамическая температура неоновой лампочки примерно равна комнатной, что не соответствует её яркостной температуре ($\approx 870^\circ\text{C}$). 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.

Вывод

В ходе работы было изучено тепловое излучение в моделях абсолютно чёрного и серого тел на примерах реальных объектов - модели АЧТ, колец из различных материалов и вольфрамовой нити. Было проведено ознакомление с принципом работы оптического пирометра - в ходе его настройки и работы с моделью АЧТ выяснилось, что разность показаний пирометра и действительной температурой составляет до 10%.

При проведении работы мы наблюдали, что для различных материалов с одинаковой термодинамической температурой их яркостная температура может не совпадать. Это связано с различием коэффициента спектрального поглощения этих материалов. Также было установлено, что не все вещества излучают по законам теплового излучения, на примере неоновой лампочки.

В работе было предложено проверить справедливость закона Стефана-Больцмана ($W \propto T^4$). Полученные значения показателя степени в зависимости $W(T)$, а также значения σ и h совпали с теоретическими в пределах погрешности измерений. Это позволяет утверждать, что примененный способ исследования закономерностей теплового излучения достаточно точен. При

необходимости ошибку измерения можно заметно уменьшить, если применить более точные приборы и градуировочные графики.

Приложение

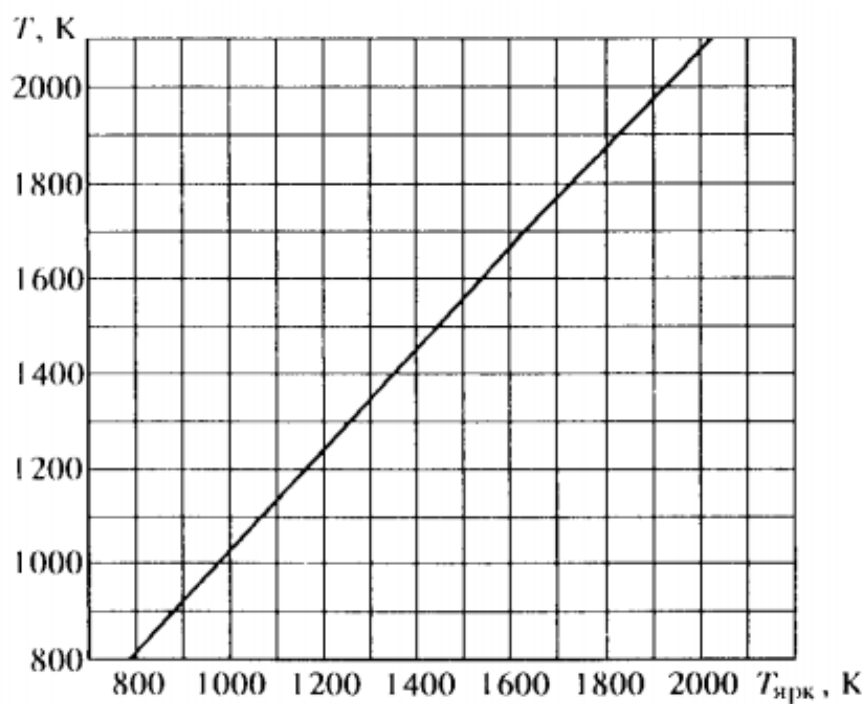


Рис. 3: График зависимости $T = f(T_{\text{ярк}})$ для вольфрама

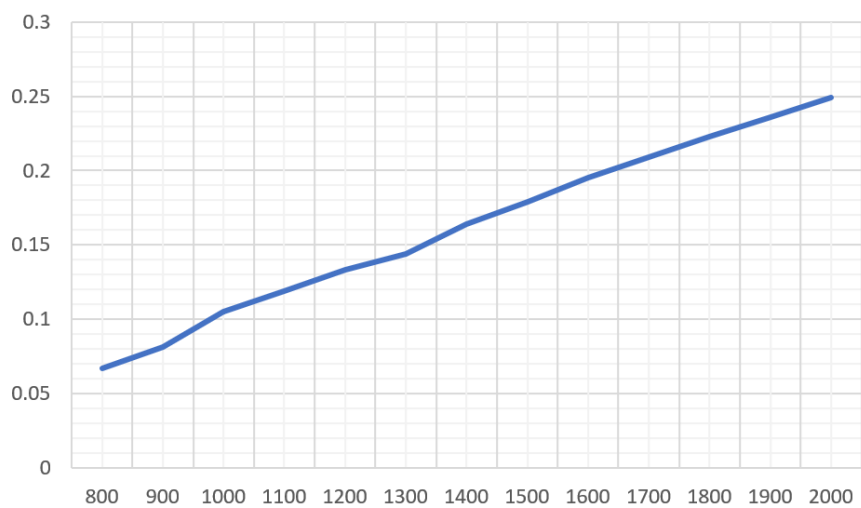


Рис. 4: График зависимости $\varepsilon_T = f(T)$ для вольфрама