

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
ФИЗТЕХ-ШКОЛА РАДИОТЕХНИКИ И КИБЕРНЕТИКИ

# Тепловое излучение

Работу выполнил:  
Шурыгин Антон Алексеевич, группа Б01-909

Долгопрудный, 2021

# Содержание

<b>1</b>	<b>Теория . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Экспериментальная установка . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Ход работы и обработка данных . . . . .</b>	<b>6</b>
3.1	Изучение работы оптического пирометра . . . . .	6
3.2	Измерение яркостной температуры тел . . . . .	7
3.3	Проверка закона Стефана-Больцмана . . . . .	7
3.4	Измерение яркостной температуры неоновой лампочки . . .	10
<b>4</b>	<b>Вывод . . . . .</b>	<b>10</b>

**Цель работы:** проведение измерения температуры оптическим пирометром с исчезающей нитью и термопарой, определение постоянных Планка и Стефана-Больцмана, исследование излучение накаливаемых тел с различной испускательной способностью.

**Оборудование:** оптический пирометр, модель абсолютно чёрного тела, образцы колец, вольфрамовая лампа, неоновая лампа, блок питания, цифровые вольтметры.

## 1 Теория

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  $T_{\text{rad}}$ , цветовую  $T_{\text{col}}$  и яркостную  $T_{\text{br}}$ . 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 термодинамическими температурами вольфрама приведена на рис. 1

По результатам измерений мощности излучения вольфрамовой нити можно судить о справедливости закона Стефана-Больцмана. Если нить излучала как АЧТ, то баланс потребляемой и излучаемой энергии

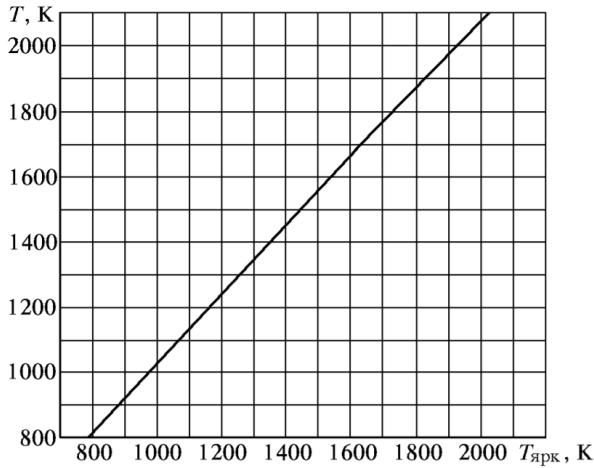


Рис. 1 График зависимости  $T = f(T_{\text{ярк}})$  для вольфрама

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  $\varepsilon_T$  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

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

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.

## 2 Экспериментальная установка

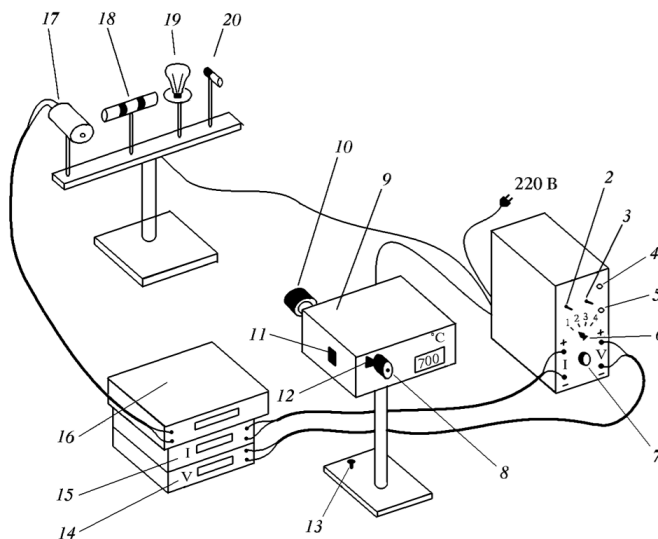


Рис. 2 Схема экспериментальной установки: 1 - блок питания; 2 - тумблер включения питания образцов; 3 - тумблер нагрева нити пирометра; 4 - кнопка "Нагрев нити"; 5 - кнопка "охлаждение нити"; 6 - тумблер переключения образцов; 7 - регулятор мощности нагрева образцов; 8 - окуляр пирометра; 9 - корпус 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 термпары; 17 - модель АЧТ; 18 - трубка с кольцами из материалов с различной излучательной способностью; 19 - лампа накаливания; 20 - неоновая лампочка

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

### 3 Ход работы и обработка данных

#### 3.1 Изучение работы оптического пирометра

С 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. Проверим корректность измерений: температура на пирометре не должна сильно отличаться от температуры АЧТ, измеренной термопарой. Результаты измерений занесём в таблицу 1.

$U, \text{mV}$	$T_{\text{room}}, \text{K}$	$T, \text{K}$	$T_{\text{br}}, \text{K}$	$\sigma_T, \text{K}$
39920	298	973,66	1000	28

Таблица 1 : настройка пирометра

Видим, что разница в показаниях приборов не превышает 3%

### 3.2 Измерение яркостной температуры тел

Показывается, что разные тела, накалинные до одинаковой термодинамической температуры, имеют различную яркостную температуру

### 3.3 Проверка закона Стефана-Больцмана

1. Постепенно увеличивая накал нити лампы, начиная со слабого тёмно-красного накала до  $1900^{\circ}\text{C}$ , будем измерять пирометром яркостную температуру нити, а также значение силы тока и напряжения на ней. Результаты измерений занесём в таблицу 2. Определим также по значениям яркостной температуры нити её термодинамическую температуру, используя рис. 1.

$T_{br}, \text{K}$	$T_{\text{термодин}}, \text{K}$	$I, \text{A}$	$U, \text{V}$	$P, \text{Wt}$	$\sigma_T$	$\sigma_I$	$\sigma_U$	$\sigma_P$
890	920	0,66	17,3	11,33805	18,4	0,01	0,17	0,205
1010	1050	0,75	24	17,88	21	0,01	0,24	0,298
1120	1150	0,85	36	30,528	23	0,01	0,36	0,471
1235	1280	0,95	44	41,8	25,6	0,01	0,44	0,607
1325	1365	1,05	51	53,397	27,3	0,01	0,51	0,737
1450	1500	1,15	61	70,15	30	0,01	0,61	0,93
1545	1600	1,25	71	88,466	32	0,01	0,71	1,133
1580	1640	1,35	83	112,133	32,8	0,01	0,83	1,395
1697	1770	1,45	91	131,495	35,4	0,01	0,91	1,597
1746	1820	1,55	106	163,876	36,4	0,02	1,06	2,675
1830	1900	1,65	120	198	38	0,02	1,2	3,111

Таблица 2 : данные для графика

2. Представим зависимость  $W = f(T)$  в логарифмическом масштабе как  $\ln(W) = \ln(\varepsilon_T \sigma S) + n \ln(T)$  По углу наклона графика можно определить показатель степени температуры в законе Стефана-Больцмана.

$$y = 3,83x - 23,71$$

$\ln(T_{\text{term}})$	$\ln(P)$	$\sigma_T$	$\sigma_P$	$\sigma_{\ln(T_{\text{term}})}$	$\sigma_{\ln(P)}$
6,82	2,43	27,6	0,019	0,02	0,018
6,96	2,88	31,5	0,025	0,02	0,017
7,05	3,42	34,5	0,037	0,02	0,015
7,15	3,73	38,4	0,045	0,02	0,015
7,22	3,98	40,95	0,052	0,02	0,014
7,31	4,25	45	0,062	0,02	0,013
7,38	4,48	48	0,072	0,02	0,013
7,4	4,72	49,2	0,084	0,02	0,012
7,48	4,88	53,1	0,092	0,02	0,012
7,51	5,1	54,6	0,107	0,02	0,016
7,55	5,29	57	0,121	0,02	0,016

Таблица 3 : данные для графика

Оценка погрешностей:

- Логарифма температуры:

$$\sigma_{\ln(T)} = \frac{\sigma_T}{T}$$

- Мощности:

$$\sigma_P = \sigma_{UI} = \sigma_P \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2}$$

- Логарифма от мощности:

$$\sigma_{\ln(P)} = \frac{\sigma_P}{P}$$

- Постоянной Стефана-Больцмана:

$$\sigma_\sigma = \sigma \sqrt{\left(\frac{\sigma_P}{P}\right)^2 + 16 \cdot \left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2}$$

- Постоянной Планка:

$$\sigma_h = h \frac{3\sigma_\sigma}{2\sigma}$$



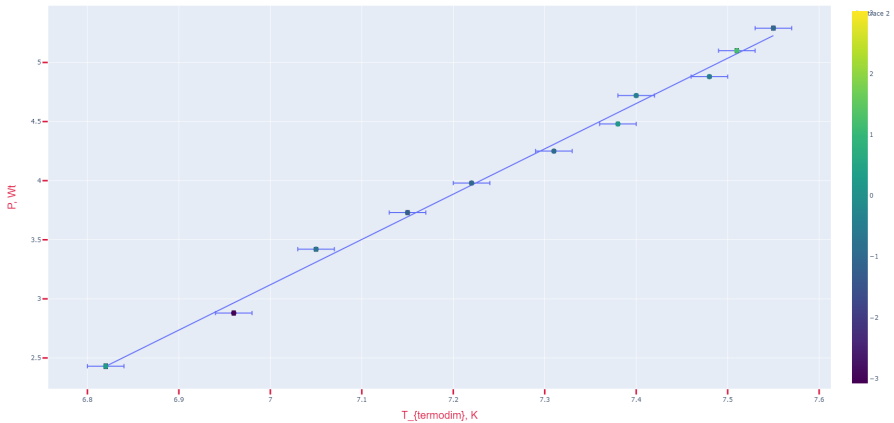


Рис. 3 Зависимость мощности лампы от её термодинамической температуры, логарифмический масштаб

3. Определим постоянную Стефана-Больцмана для трех значений термодинамической температуры  $T_{\text{term}}$  по формуле:

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

- $T_1 = 1770 \text{ K} \Rightarrow \sigma_1 = \frac{W}{\varepsilon_T S T_1^4} \approx (8,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}^{-4}}$
- $T_2 = 1820 \text{ K} \Rightarrow \sigma_2 = \frac{W}{\varepsilon_T S T_2^4} \approx (9,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}^{-4}}$
- $T_3 = 1900 \text{ K} \Rightarrow \sigma_3 = \frac{W}{\varepsilon_T S T_3^4} \approx (10,9 \pm 0,3) \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}^{-4}}$

Также можно определить постоянную Стефана-Больцмана, используя построенный график зависимости  $\ln(W) = \ln(\varepsilon_T \sigma S) + n \ln(T)$ . По графику видно, что  $n \approx 3,81 \approx 4$ , что лучше соответствует теории, нежели результаты выше.

$$\sigma_{\text{th}} = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

4. Оценим значение постоянной Планка, взяв значения из приближения двойного логарифмического масштаба, т.к. он показал более точный результат оценки константы Стеффана-Больцмана.

При  $T_{\text{term}} \approx 1900\text{K}$ ,  $P_{\text{ols}} \approx 186,3\text{ Вт} \Rightarrow \sigma_{\text{ols}} = (7,09 \pm 0,4) \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$

$$h = \sqrt[3]{\frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 \sigma}} \approx (6,14 \pm 0,3) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Что в пределах погрешности практически соответствует действительности.

### 3.4 Измерение яркостной температуры неоновой лампочки

Термодинамическая температура неоновой лампочки примерно равна комнатной, и не соответствует её яркостной температуре ( $\approx 830^\circ\text{C}$ ). 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.

## 4 Вывод

В ходе работы было изучено тепловое излучение модели абсолютно чёрного тела и моделей серых тел - 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 3% . Этот фактор мог быть причиной того, что в ходе работы закон Стеффана-Больцмана был подтвержден неидеально точно.

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.

В работе было предложено проверить справедливость закона Стефана-Больцмана ( $W \propto T^4$ ).

Также по результатам измерений была оценена постоянная Стефана-Больцмана двумя способами - непосредственно используя формулу (2) и используя график зависимости  $W(t)$  в логарифмическом масштабе. Вторым способ оказался более точным. Ниже приведены результаты расчетов и теоретическое значение постоянной Стефана-Больцмана.

$$\sigma_1 \approx (8,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}^{-4}}$$

$$\sigma_{\text{ols}} = (7,09 \pm 0,4) \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

$$\sigma_{\text{th}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

Относительная погрешность для метода наименьших квадратов составила  $\approx 14\%$ , что не очень хорошо согласуется с заявленной погрешностью в  $3\%$  ранее. Причин несовпадения в пределах погрешности может быть несколько:

- неидеальное определение момента "исчезновения" нити.
- увеличение погрешности пирометра в при переходе в температуры  $T > 1800 \text{ K}$ , в виду изменения режима работы.

Значение постоянной Планка измеренное, теоретическое:

$$h \approx (6,14 \pm 0,3) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$h_{\text{th}} = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Наконец, в ходе работы с помощью пирометра была определена "яркостная температура" неоновой лампочки, не являющейся моделью АЧТ. Эта яркостная температура не совпадает с термодинамической