

Московский Физико-Технический Институт  
(государственный университет)

Лабораторная работа 5.8.1

---

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

---

Автор:  
Овсянников Михаил Б01-008



Долгопрудный, 2022

# Содержание

Теоретические сведения . . . . .	3
Экспериментальная установка . . . . .	5
Ход работы . . . . .	7
Вывод . . . . .	13

**Цель работы:** При помощи модели абсолютно черного тела (АЧТ) провести измерения температуры оптическим пирометром с исчезающей нитью и термопарой, исследовать излучение нагретых тел с различной излучательной способностью, определить постоянные Планка и Стефана–Больцмана.

## Теоретические сведения

Для измерения температуры нагретых тел, удаленных от наблюдателя, применяют методы оптической пирометрии, основанные на использовании зависимости излучательной способности исследуемого тела от температуры. Различают три температуры, функционально связанные с истинной термодинамической температурой и излучательной способностью тела: радиационную  $T_{\text{рад}}$ , цветовую  $T_{\text{цв}}$  и яркостную  $T_{\text{ярк}}$ .

Под радиационной (энергетической) температурой понимают температуру абсолютно черного тела, при которой его интегральная излучательная способность одинакова с интегральной излучательной способностью исследуемого тела.

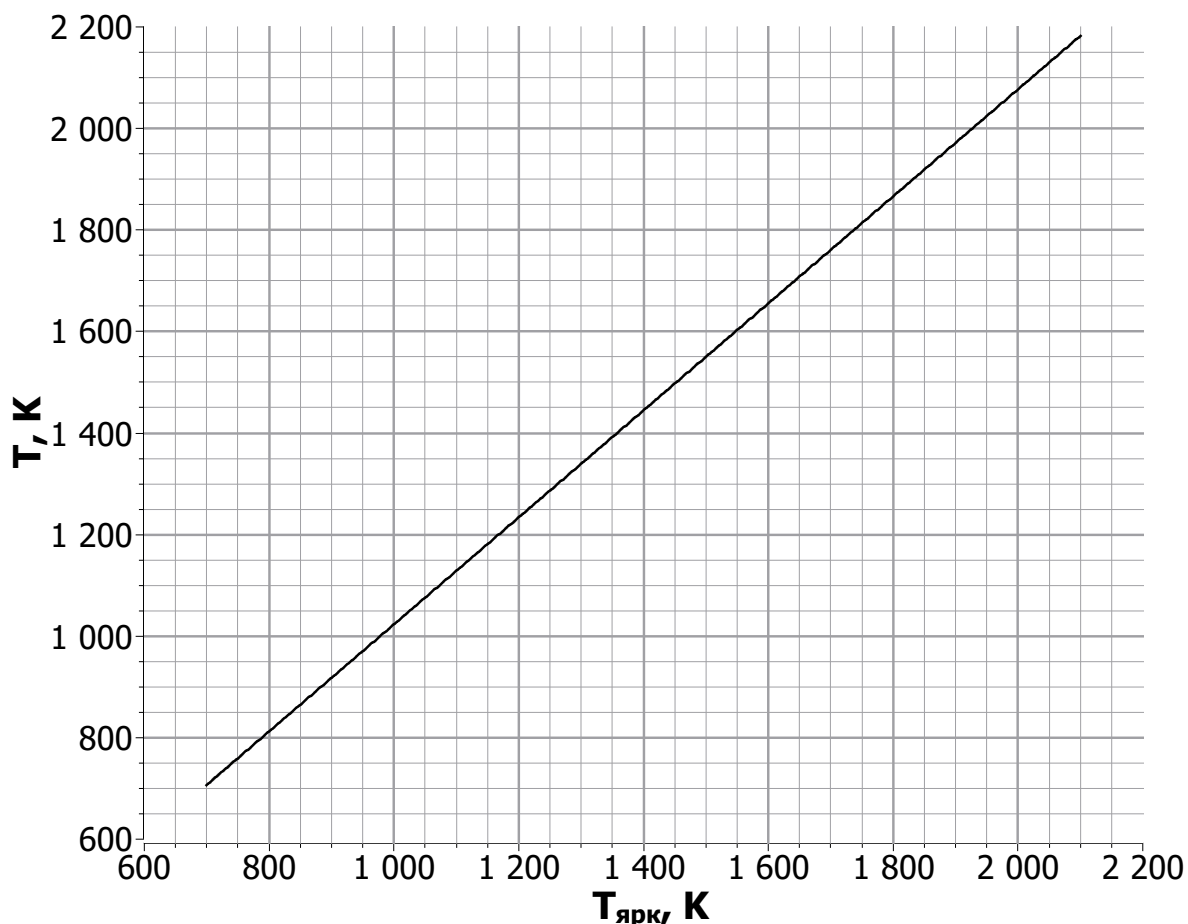
Под цветовой температурой исследуемого тела понимают температуру абсолютно черного тела, при которой отношение их спектральных излучательных способностей для двух заданных длин волн одинаково.

Под яркостной температурой понимают температуру абсолютно черного тела, при которой его спектральная излучательная способность равна спектральной излучательной способности исследуемого тела при той же длине волны. Именно эту температуру мы будем измерять в данной работе.

Измерение яркостной температуры раскаленного тела производится при помощи оптического пирометра с исчезающей нитью, основанного на визуальном сравнении яркости раскаленной нити с яркостью изображения исследуемого тела.

Оптический пирометр представляет собой зрительную трубу, внутри которой имеется накаливаемая нить, расположенная в плоскости изображения исследуемого раскаленного тела, а также темно-красный светофильтр. Через окуляр одновременно наблюдается изображение исследуемого тела и раскаленной нити.

Если в том узком спектральном интервале, который пропускается светофильтром, яркость нити меньше яркости раскаленного тела, то нить видится темной полоской на светлом фоне, и наоборот. При совпадении яркостей нить перестает быть видимой на фоне изображения раскаленного тела. Регулировка яркости нити осуществляется изменением тока, протекающего через нее.



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

Если предположить, что нить излучает как серое тело, то выражение (Рис. 1) можно записать в виде

$$W = \varepsilon_T S \sigma T^4. \quad (1)$$

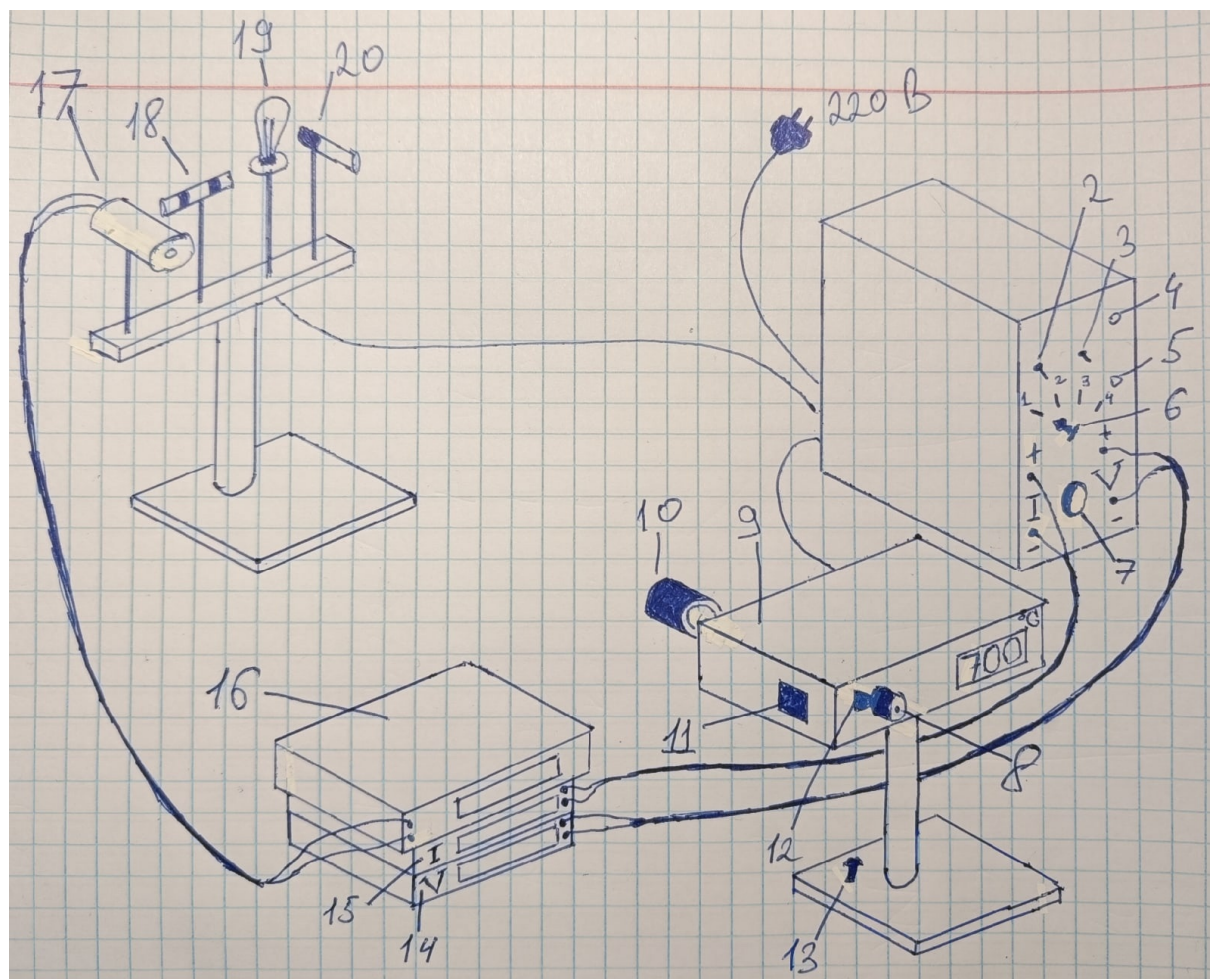
Значения коэффициента излучения  $\varepsilon_T$  при различных температурах приведены в таблице 1.

$T, \text{ K}$	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
$\varepsilon_T$	0,067	0,081	0,105	0,119	0,133	0,144	0,164	0,179	0,195	0,209	0,223	0,236	0,249

**Таблица 1.** Поправочные коэффициенты излучения для вольфрама

Измерив температуру вольфрамовой нити в зависимости от подводимой мощности, можно убедиться в справедливости закона Стефана–Больцмана применительно к серому телу (в данном случае к вольфраму). Из формулы (1) можно определить также и величину постоянной  $\sigma$  в законе Стефана–Больцмана.

## Экспериментальная установка



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки

1 — блок питания; 2 — тумблер включения питания пирометра и образцов; 3 — тумблер нагрева нити пирометра: «Быстро» — вверх, «Медленно» — вниз; 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: 700–1200°С — вниз, 1200–2000°С — вверх; 12 — ручка перемещения 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 разной излучательной способностью; 19 — лампа накаливания; 20 — неоновая лампочка.

Экспериментальная установка (Рис. 2) состоит из оптического пирометра 9, модели абсолютно черного тела (АЧТ), трех исследуемых образцов (18, 19, 20), блока питания (1) и цифровых вольтметров В7-22А

и В7-38.

Пирометр 9 с исчезающей нитью включает в себя объектив 10, окуляр 8, монохроматический (красный) светофильтр 4, позволяющий рассматривать в лучах красного цвета нить пирометра на фоне изображения накаливаемого исследуемого тела. Перемещение светофильтра осуществляется сектором 12.

Модель АЧТ представляет собой керамическую трубку диаметром 3 мм и длиной 50 мм, закрытую с одного конца и окруженную для теплоизоляции внешним кожухом. Нагрев трубки осуществляется намотанной на ней нихромовой спиралью, питаемой от источника тока. Полость трубки и особенно ее дно излучают практически как абсолютно черное тело. Температура модели АЧТ измеряется хромель-алюмелевой термопарой, один спай которой вмонтирован в дно трубки, а другой находится при комнатной температуре на клемме цифрового вольтметра В7-38, измеряющего ЭДС термопары.

В работе исследуются три образца. Один образец выполнен в виде керамической трубки с набором колец из различных материалов, нагреваемой изнутри нихромовой спиралью. Материалы колец имеют различную испускательную способность. Спираль подключается к источнику питания 1 с помощью переключателя 6 (положение 2) и может нагревать трубку до температуры около 1100 °С. Термодинамическая температура колец практически одинакова и равна температуре трубки.

Другой исследуемый образец — вольфрамовая нить электрической лампочки. Она питается от источника 1, когда переключатель 6 находится в положении 3. Сила тока через вольфрамовую нить измеряется с помощью прибора В7-22А (15). Падение напряжения на самой нити измеряется непосредственно вольтметром В7-22А (16). Таким образом, зная показания обоих приборов, можно определить мощность, потребляемую нитью лампочки.

Источник питания 1, используемый в работе, снабжен устройством, отключающим в случае перегрузки прибор от потребителя, в этот момент загорается сигнальная лампочка «перегрузка» на передней панели прибора. Если это произойдет, то надо отключить питание прибора от сети 220 В и уменьшить напряжение на его выходе, а затем повторно включить источник питания.

## Ход работы

### I. Изучение работы оптического пирометра

1. Выведем оба светофильтра пирометра (серый и красный) с помощью переключателя 11 и сектора 12.
2. Подключим питание пирометра и образцов с помощью тумблера 2 к сети 220 В.
3. Нажмем кнопку 4 и, удерживая ее, доведем показания пирометра, а, следовательно, и температуру его нити до 900 – 950 °С. Направим пирометр на модель АЧТ. Переключатель 6 поставим в положение 1 (АЧТ), подав тем самым питание на нагревательную спираль модели АЧТ. Повернем ручку 7 регулятора мощности нагрева по часовой стрелке до упора. Через 10–15 минут дно модели АЧТ нагреется до красного каления.

Перемещением объектива 10 пирометра добьемся четкого изображения поверхности дна модели АЧТ.

4. Введем поворотом сектора 12 красный светофильтр пирометра.
5. Нажмем и будем удерживать кнопку 4 или 5, увеличивая или уменьшая ток через нить пирометра, добьемся исчезновения нити на фоне изображения раскаленной поверхности дна модели АЧТ. Опыт повторим несколько раз, подходя поочередно от меньшей яркости, когда нить кажется темной на фоне дна АЧТ, и от большей яркости, когда нить кажется более светлой, чем дно АЧТ.
6. Определим по шкале пирометра значение яркостной температуры модели АЧТ. Одновременно следует измерить температуру модели АЧТ при помощи хромель-алюмелевой термопары и цифрового вольтметра 16. Результаты поместим в таблицу 2.

Показания пирометра $T_{\text{ярк}}$ , К	Показания термопары $T_{\text{ярк}}$ , К
1243	1232
1244	

**Таблица 2.** Яркостная температура АЧТ

Как видим, результаты достаточно близки друг к другу, даже почти совпадают. Погрешность составляет  $\sim 1\%$ . Следовательно, пирометр работает исправно.

## II. Измерение яркостной температуры накаливаемых тел

1. Этот эксперимент предполагает показать, что различные тела, накаливаемые до одинаковой термодинамической температуры, имеют различную яркостную температуру.
2. Направим пирометр на поверхность керамической трубки с кольцами из различных материалов. Переключатель 6 поставим в положение 2 «Кольца». Так же, как и в пункте I, установив регулятор мощности нагрева 7 на максимум, нагреем трубку до темно-красного каления.
3. Измерим яркостную температуру поверхности трубки и каждого из колец. Результаты заносим в таблицу 3.

Тело	Яркостная температура $T_{\text{ярк}}$ , К
Трубка	1188
Левое кольцо	1123
Правое кольцо	1113

**Таблица 3.** Яркостная температура разных тел

Как видим, яркостные температуры для этих тел различны. Объясняется это тем, что каждое из этих тел лишь на какую-то долю можно считать АЧТ, причем у тел эти доли разные.

## III. Проверка закона Стефана–Больцмана

1. Направим пирометр на нить лампы накаливания. Поставим переключатель 6 в положение 3 («Лампа»).
2. Постепенно увеличивая при помощи ручки «7» накал нити лампы, начиная со слабого темно-красного накала вплоть до 1900 °С, будем измерять пирометром яркостную температуру нити через каждые 100 °С. При каждом измерении температуры будем записывать также величину тока и падения напряжения на нити лампы. Данные занесем в таблицу 4.
3. Для каждого значения измеренной яркостной температуры найдем термодинамическую температуру вольфрамовой нити лампы, пользуясь графиком (1):  $T = f_1(T_{\text{ярк}})$ .  $T$  — абсолютная температура. Вычислим для каждого значения термодинамической температуры



мощность, потребляемую нитью лампы. Вычисления запишем в таблицу 4. Также построим таблицу для значений с их погрешностями 5.

Для лучшего визуального анализа построим график зависимости  $W = f_2(T)$ .

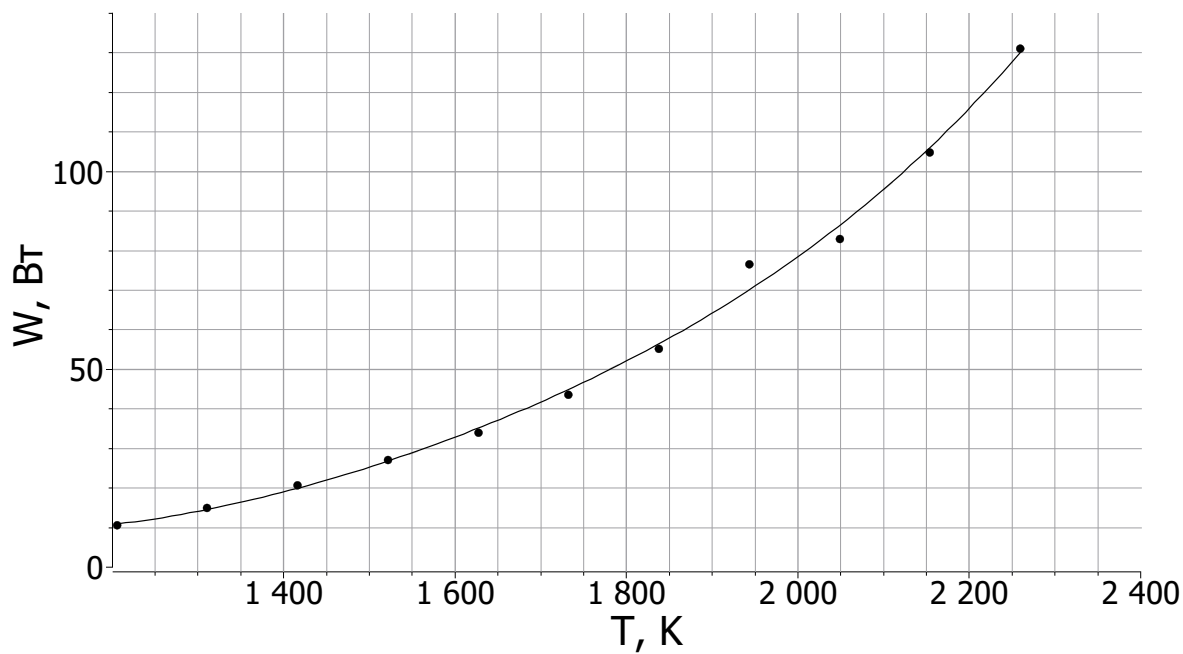


Рис. 3. График зависимости  $W(T)$

$t, ^\circ C$	$T_{\text{ярк}}, K$	$T, K$	$I, A$	$V, B$	$W, Вт$
900	1173	1205	0,637	16,51	10,52
1000	1273	1311	0,703	21,31	14,98
1100	1373	1416	0,772	26,81	20,70
1200	1473	1522	0,837	32,35	27,08
1300	1573	1627	0,900	37,77	33,99
1400	1673	1732	0,977	44,62	43,60
1500	1773	1838	1,057	52,25	55,23
1600	1873	1943	1,145	66,89	76,59
1700	1973	2049	1,215	68,30	82,98
1800	2073	2154	1,317	79,60	104,83
1900	2173	2259	1,426	91,90	131,05

Таблица 4. Зависимость мощности от температуры

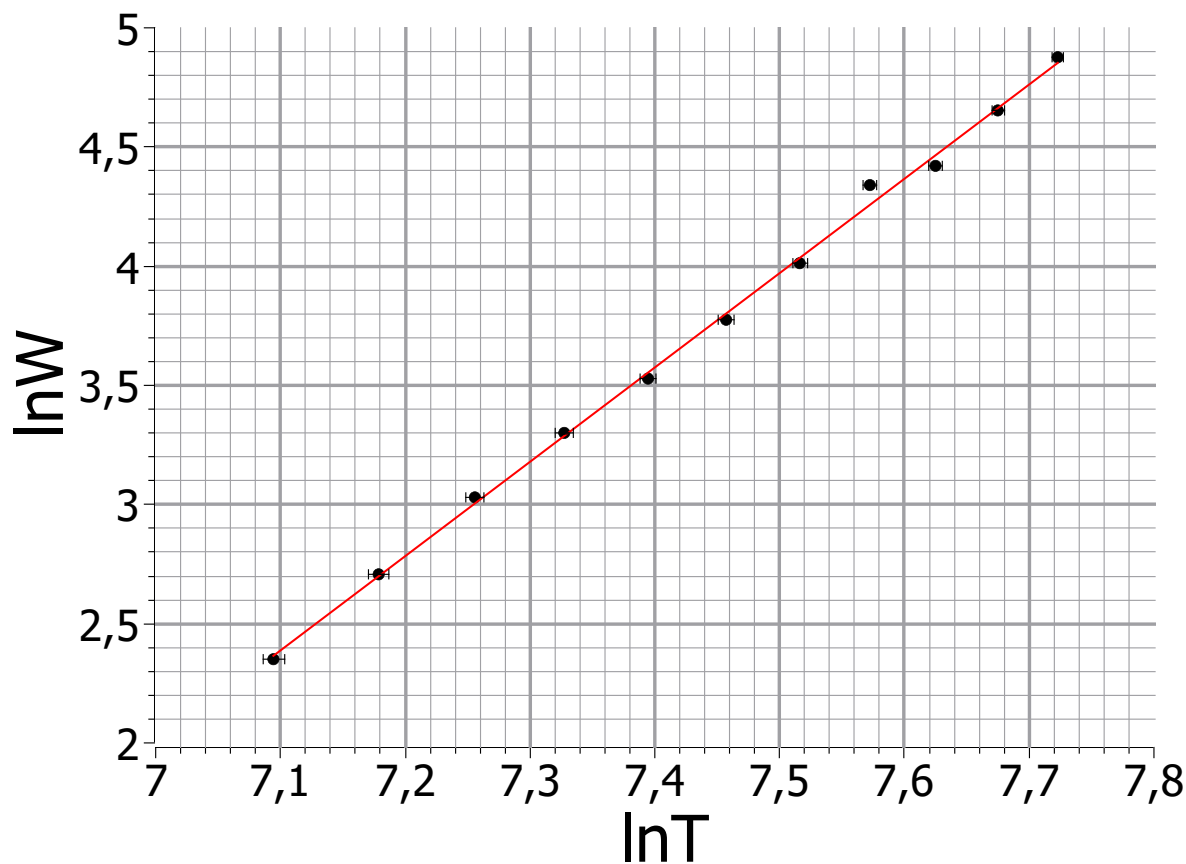
$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_t$	$T_{\text{ярк}}, \text{K}$	$\sigma_{T_{\text{ярк}}}, \text{K}$	$T, \text{K}$	$\sigma_T, \text{K}$	$I, \text{A}$	$\sigma_I, \text{A}$	$V, \text{B}$	$\sigma_V, \text{B}$	$W, \text{BT}$	$\sigma_W, \text{BT}$	$\ln T$	$\sigma_{\ln T}$	$\ln W$	$\sigma_{\ln W}$
900	1	1173	1	120	1,054	0,637	0,001	16,51	0,01	10,52	0,02	7,094602	0,0009	2,352981	0,002
1000	1	1273	1	1311	1,054	0,703	0,001	21,31	0,01	14,98	0,02	7,178425	0,0008	2,706778	0,002
1100	1	1373	1	1416	1,054	0,772	0,001	26,81	0,01	20,70	0,03	7,255762	0,0008	3,030004	0,002
1200	1	1473	1	1522	1,054	0,837	0,001	32,35	0,01	27,08	0,04	7,327545	0,0007	3,298683	0,002
1300	1	1573	1	1627	1,054	0,900	0,001	37,77	0,01	33,99	0,04	7,394519	0,0007	3,526155	0,002
1400	1	1673	1	1732	1,054	0,977	0,001	44,62	0,01	43,59	0,05	7,457287	0,0006	3,774914	0,001
1500	1	1773	1	1838	1,054	1,057	0,001	52,25	0,01	55,23	0,06	7,516347	0,0006	4,011475	0,001
1600	1	1873	1	1943	1,054	1,145	0,001	66,89	0,01	76,59	0,07	7,572113	0,0006	4,338454	0,001
1700	1	1973	1	2049	1,054	1,215	0,001	68,30	0,01	82,98	0,07	7,624933	0,0006	4,418654	0,001
1800	1	2073	1	2154	1,054	1,317	0,001	79,60	0,01	104,83	0,08	7,675101	0,0005	4,652371	0,001
1900	1	2173	1	2259	1,054	1,426	0,001	91,90	0,01	131,05	0,10	7,722873	0,0005	4,875574	0,001

**Таблица 5.** Зависимость мощности от температуры вместе с погрешностями

4. Для проверки закона Стефана–Больцмана построим в логарифмическом масштабе график зависимости  $W = \varepsilon_T B T^n$ , т. е. функцию

$$\ln W = \ln(\varepsilon_T B) + n \ln T$$

и определим величину  $n$  как тангенс угла наклона прямой.



**Рис. 4.** Зависимость  $\ln W(\ln T)$

Из графика мы получаем следующее:

- $n = (3,96 \pm 0,05)$ . То есть очень близко к теоретическому  $n = 4$  и в пределах погрешности даже совпадает с ним.
- $\ln(\varepsilon_T B) = (-25,7 \pm 0,4)$ .

5. Найдем величину постоянной Стефана–Больцмана по формуле

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

для каждого значения  $T$ , превышающего 1700 К. Расчеты приведены в таблице 6:

$T, \text{ K}$	$\sigma, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$
1732	$(6,33 \pm 0,02) \cdot 10^{-7}$
1838	$(5,89 \pm 0,02) \cdot 10^{-7}$
1943	$(6,10 \pm 0,02) \cdot 10^{-7}$
2049	$(5,02 \pm 0,02) \cdot 10^{-7}$
2154	$(4,89 \pm 0,02) \cdot 10^{-7}$
2259	$(4,77 \pm 0,01) \cdot 10^{-7}$

**Таблица 6.** Значения постоянной Стефана–Больцмана для разных температур

Как видим, все значения одного порядка. Однако они на порядок больше табличного значения  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ .

Общее значение из эксперимента  $\sigma = (5,50 \pm 0,02) \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ .

6. По найденному значению  $\sigma$  определим величину постоянной Планка  $h$  по формуле:

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

Отсюда выходит:

$$h = (3,104 \pm 0,004) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Значение совпадает по порядку с табличным  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ , отличие в 2 раза.

#### IV. Измерение «яркостной температуры» неоновой лампочки

Направим пирометр на неоновую лампочку. Поставим переключатель 6 в положение 4 («Неоновая лампочка») и измерим пирометром «яркостную температуру» неоновой лампочки.  $T_{\text{ярк}} = 1295 \text{ K}$ .

Дотронувшись до лампочки рукой, убедимся, что термодинамическая температура лампочки не соответствует измеренной «яркостной температуре» нагретого тела. Лампочка чуть тепла.

## Вывод

В данной работе мы провели исследование излучения нагретых тел с различной испускательной способностью. Мы убедились, что яркостная температура меньше термодинамической, причем у разных тел при одинаковой термодинамической разная яркостная. Вдобавок, мы смогли экспериментально оценить значение постоянной Стефана–Больцмана  $\sigma = (5,50 \pm 0,02) \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ . Отличие от табличного значения на порядок. Также, рассчитали постоянную Планка  $h = (3,104 \pm 0,004) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ . Это значение отличается от табличного в 2 раза (что и происходит, поскольку  $\sigma$  отличается от табличного на порядок). Такие большие отличия обусловлены несовершенством методики измерения.