

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа аэрокосмических технологий

Лабораторная работа №5.8.1
Тепловое излучение

Работу выполнила
Цветкова Амелия Антоновна
Б03-305

Долгопрудный, 2025

Цели работы

1. При помощи модели абсолютно черного тела (АЧТ) провести измерения температуры оптическим пирометром с исчезающей нитью и термопарой;
2. Исследовать излучение нагретых тел с различной излучательной способностью;
3. 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 нагретого тела производится при помощи оптического пирометра с исчезающей нитью, основанного на визуальном сравнении яркости нагретой нити с яркостью изображения исследуемого тела. Равенство видимых яркостей, наблюдаемых через монохроматический светофильтр ($\lambda = 6500 \text{ \AA}$), фиксируется по исчезновению изображения нити на фоне нагретого тела. Яркостный метод измерения температуры основан, в соответствии с формулой Планка, на зависимости излучательной способности абсолютно черного тела от температуры и длины волны.

Оптический пирометр представляет собой зрительную трубу, внутри которой имеется накаливаемая нить, расположенная в плоскости изображения исследуемого нагретого тела, а также темно-красный светофильтр ($\lambda = 6500 \text{ \AA}$). Через окуляр одновременно наблюдается изображение исследуемого тела и нагретой нити.

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

Пирометр с исчезающей нитью включает в себя объектив, окуляр, монохроматический (красный) светофильтр, позволяющий рассматривать в лучах красного цвета (6500 \AA) нить пирометра на фоне изображения нагретого исследуемого тела. Пирометр имеет два диапазона измерений: $700 \div 1200^\circ\text{C}$ и $1200 \div 2000^\circ\text{C}$. Переключение осуществляется введением серого светофильтра, регулировка накала нити пирометра выведена на лицевую панель блока питания.

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 смонтирован 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 с помощью переключателя и может нагревать трубку до температуры около 1100°C . Термодинамическая температура колец практически одинакова и равна температуре трубки.

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

Источник питания, используемый в работе, снабжен устройством, отключающим в случае перегрузки прибор от потребителя, в этот момент загорается сигнальная лампочка «перегрузка» на передней панели прибора.

Вначале с помощью модели абсолютно черного тела проверяется правильность работы пиromетра, а затем с его помощью исследуется излучение различных материалов и вольфрамовой нити накаливания. Необходимая для обработки проводимых в данной работе измерений зависимость между яркостной и термодинамическими температурами вольфрама приведена на рис.:

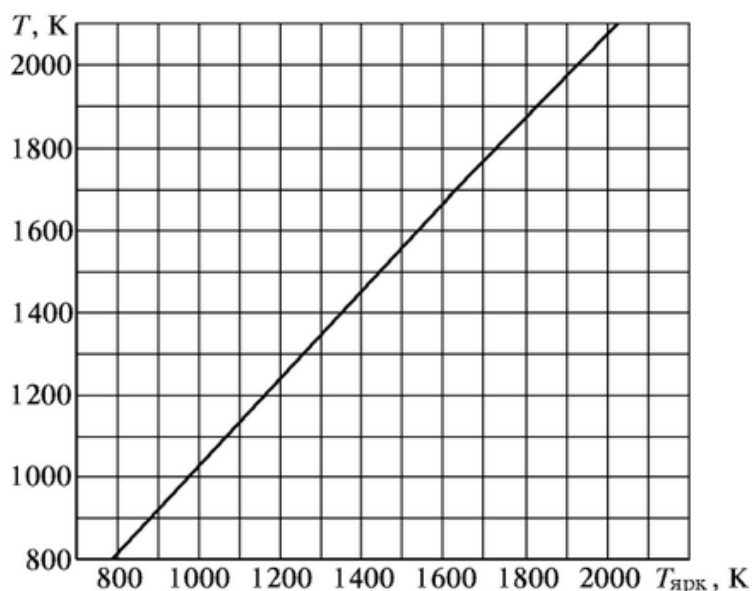


Рис. 1: График зависимости $T = f(T_{\text{ярк}})$ для вольфрама

По результатам измерений мощности излучения вольфрамовой нити можно судить о справедливости закона Стефана–Больцмана. Для этого следует мощность, потребляемую нитью, приравнять к излучаемому ею за единицу времени количеству энергии. Если бы нить излучала как абсолютно черное тело, то баланс потребляемой и излучаемой энергии определялся бы соотношением:

$$W = \sigma S(T^4 - T_0^4),$$

где W — потребляемая нитью электрическая мощность, S — площадь излучающей поверхности нити, T — температура нити, T_0 — температура окружающей среды.

Однако вольфрамовая нить излучает как нечерное тело. Среди нечерных тел выделяются так называемые серые тела, для которых характер распределения излучения совершенно подобен спектру абсолютно черного тела, но излучение ослаблено по сравнению с ним в ε_T раз для любой длины волны при данной температуре тела T .

Если предположить, что нить излучает как серое тело, то выражение можно записать в виде:

$$W = \varepsilon_T S \sigma T^4,$$

где мы учли, что реально температура вольфрама намного выше температуры окружающей среды.

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. 2: 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). Для этого нужно построить график зависимости $W(T)$ в логарифмическом масштабе и по наклону определить показатель степени n исследуемой температурной зависимости. Понятно, что в пределах погрешности показатель степени должен быть близок к четырем.

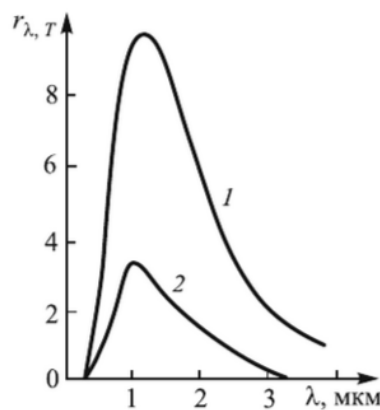


Рис. 3: Распределение энергии в спектре излучения: 1 - абсолютно черное тело; 2 - вольфрам. Температура 2450 K

Из формулы можно определить также и величину постоянной σ в законе Стефана–Больцмана. Некоторое отличие величин n и σ , полученных экспериментально, от теоретических значений может быть объяснено особенностью вольфрама, у которого наблюдается селективность излучения в коротковолновом диапазоне. Селективность излучения вольфрама становится особенно

заметной при ярком накале, когда его температура составляет около 2400 К. Оказывается, что излучение в видимой области спектра существенно больше, чем это следует из распределения Планка, примененного к серому телу.

В частности, именно поэтому вольфрам и выбран в качестве материала в лампах накаливания. При меньших температурах селективность излучения проявляется слабее, но при этом все большую роль играет теплоотвод от нити, что в свою очередь ведет к ошибке в определении величин n и σ .

Проведя измерения в диапазоне температур от 800 до 1500°C, можно выяснить, в каком участке этого интервала температур вольфрамовая нить лампы накаливания излучает почти как серое тело, т.е. величины n и σ соответствуют теоретическим значениям.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка 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 (6500 Å) нить пирометра на фоне изображения накаливаемого исследуемого тела. Перемещение светофильтра осуществляется сектором 12. Пирометр имеет два диапазона измерений: 700 ÷ 1200°C и 1200 ÷ 2000°C. Переключение осуществляется введением серого светофильтра при помощи переключателя 11 «Включение». Регулировка накала нити пирометра выведена на лицевую панель блока питания.

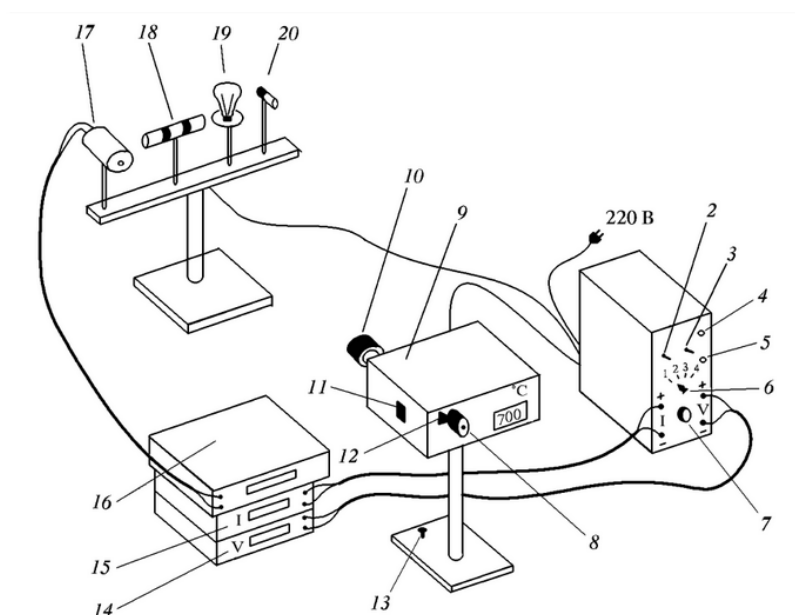


Рис. 4: Схема экспериментальной установки: 1 — блок питания; 2 — тумблер включения питания пирометра и образцов; 3 — тумблер нагрева нити пирометра: «Быстро» — вверх, «Медленно» — вниз; 4 — кнопка «Нагрев нити»; 5 — кнопка «Охлаждение нити»; 6 — тумблер переключения образцов; 7 — регулятор мощности нагрева образцов; 8 — окуляр пирометра; 9 — корпус пирометра; 10 — объектив пирометра; 11 — переключение диапазонов: 700–1200°C — вниз, 1200–2000°C — 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.

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 колен из различных материалов, нагреваемой изнутри нихромовой спиралью. Материалы колен имеют различную испускательную способность. Спираль подключается к источнику питания 1 с помощью переключателя 6 (положение 2) и может нагревать трубку до температуры около 1100°C. Термодинамическая температура колен 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. Выводим оба светофильтра пирометра с помощью переключателей;
2. Подключаем питание и доводим показания пирометра до 900-950°C. Добиваемся четкого изображения поверхности дна модели АЧТ;
3. Определим по шкале пирометра значение яркостной температуры модели АЧТ. Одновременно измеряем температуру модели АЧТ с помощью хромель-алюмелевой термопары и цифрового вольтметра. Постоянная термопары 41 мкВ/°C.

Температура яркостная АЧТ, °C	944	973	962
Напряжение на термопаре, В	38.96	39.17	39.06
Температура на пирометре, °C	970	975.4	973
Разность значений, %	2.8	0.2	1.14

Убедились, что значения температуры, получаемые обоими способами, мало отличаются друг от друга (не более 3%).

II. Измерение яркостной температуры накаливаемых тел

Этот эксперимент показывает, что различные тела, нагретые до одинаковой термодинамической температуры, имеют различную яркостную температуру.

1. Направим пирометр на поверхность керамической трубки с кольцами из различных материалов;

Температура яркостная АЧТ, °C	813		837
Температура левого кольца, °C	830	825	829
Температура правого кольца, °C	805	799	803

- Измерим яркостную температуру поверхности трубки и каждого из колец:

Несовпадение яркостной температуры у различных тел, нагретых до одинаковой термодинамической температуры, вытекает из того, что эти две величины связаны, в том числе, через спектральный коэффициент поглощения, который зависит от материала.

III. Проверка закона Стефана-Больцмана

- Направляем пирометр на нить лампы накаливания. Постепенно увеличивая накал нити лампы, измеряем пирометром яркостную температуру нити;
- Для каждого значения измеренной яркостной температуры находим термодинамическую, пользуясь графиком $T = f_1(T_{\text{ярк}})$. Вычисляем для каждой термодинамической температуры мощность, потребляемую нитью лампы.

Из рисунка 1: $T_{\text{терм}} = 1.04 \cdot T_{\text{ярк}} - 32$

I , мА	U , В	$T_{\text{ярк}}$, °C	$T_{\text{терм}}$, °C	$W = IU$, мВт
0.493	1.516	908	912.3	747.4
0.489	1.487	999	1007.0	727.1
0.556	2.054	1100	1112.0	1142.0
0.616	2.612	1200	1216.0	1609.0
0.723	3.685	1300	1320.0	2663.0
0.894	5.671	1400	1424.0	5070.0
1.015	7.222	1500	1528.0	7330.0
1.128	8.830	1600	1632.0	9960.0
1.127	8.800	1700	1736.0	9917.6

$$\sigma_{T_{\text{терм}}} = 1.04 \cdot \sigma_{T_{\text{ярк}}} = 1.04 \cdot 2.0 = 2.1^\circ\text{C}$$

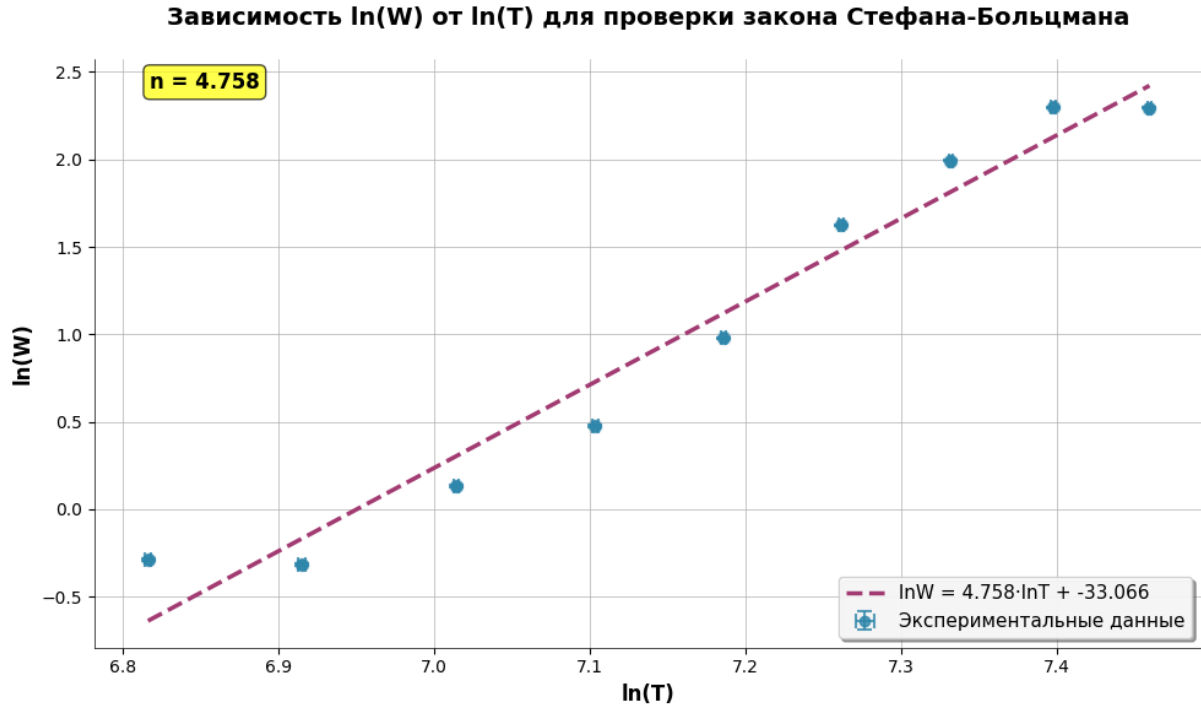
$$\sigma_W = W \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2} \iff \sigma_W = \sqrt{(U \cdot \sigma_I)^2 + (I \cdot \sigma_U)^2}$$

σ_I , мА	σ_U , В	$\sigma_{T_{\text{ярк}}}$, °C	$\sigma_{T_{\text{терм}}}$, °C	σ_W , мВт
0.003	0.005	2	2.1	5.2
0.003	0.005	2	2.1	5.1
0.003	0.005	2	2.1	6.9
0.003	0.005	2	2.1	8.7
0.003	0.005	2	2.1	12.8
0.003	0.005	2	2.1	19.4
0.003	0.005	2	2.1	26.3
0.003	0.005	2	2.1	32.9
0.003	0.005	2	2.1	32.8

- 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 в области высоких температур, когда мощность, подводимая к нити, практически полностью расходуется на излучение.



Погрешности коэффициентов(т.к. погрешности точек малы):

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{n}{n \sum (\ln T_i)^2 - (\sum \ln T_i)^2} \cdot \frac{\sum [\ln W_i - (k \ln T_i + b)]^2}{n - 2}} = 0.042$$

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{\sum (\ln T_i)^2}{n \sum (\ln T_i)^2 - (\sum \ln T_i)^2} \cdot \frac{\sum [\ln W_i - (k \ln T_i + b)]^2}{n - 2}} = 0.350$$

$$n = 4.758 \pm 0.042 (\varepsilon = 0.88\%)$$

Значение ε_T берется из рисунка 2. Известно, что $B = S \cdot \varepsilon_T$, где S - эффективная площадь излучающей поверхности нити лампы при температуре более 1500°C , когда вся нить одинаково накалена; σ - постоянная Стефана-Больцмана, $S = 0,36\text{см}^2$.

4. Найдем величину постоянной Стефана-Больцмана по формуле:

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

для каждого измеренного значения T , превышающего 1500K .

T, K	ε_T	$W, \text{мВт}$	$\sigma, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$	$h, \text{Дж} \cdot \text{с}$
1500	0.179	7330.0	$5.89 \cdot 10^{-8}$	$6.87 \cdot 10^{-34}$
1600	0.195	9960.0	$5.21 \cdot 10^{-8}$	$7.12 \cdot 10^{-34}$
1700	0.209	9917.6	$4.07 \cdot 10^{-8}$	$7.68 \cdot 10^{-34}$

5. По найденным значениям σ определим величину постоянной Планка по формуле (результаты в таблице выше):

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

Табличные значения:

$$\sigma_{\text{табл}} = 5.670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4) \quad h_{\text{табл}} = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Расчет погрешностей:

$T, \text{ К}$	$\sigma, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$	$\delta\sigma, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$	$\delta\sigma/\sigma, \%$	$\delta h, \text{ Дж} \cdot \text{с}$	$\delta h/h, \%$
1500	$5.89 \cdot 10^{-8}$	$0.89 \cdot 10^{-8}$	15.1	$0.35 \cdot 10^{-34}$	5.0
1600	$5.21 \cdot 10^{-8}$	$0.78 \cdot 10^{-8}$	15.0	$0.36 \cdot 10^{-34}$	5.1
1700	$4.07 \cdot 10^{-8}$	$0.61 \cdot 10^{-8}$	15.0	$0.38 \cdot 10^{-34}$	5.0

$$\delta\sigma = \sigma \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta W}{W}\right)^2 + \left(\frac{\delta\varepsilon_T}{\varepsilon_T}\right)^2 + \left(4\frac{\delta T}{T}\right)^2}$$

$$\delta h = \frac{1}{3}h \cdot \frac{\delta\sigma}{\sigma}$$

IV. Измерение "яркостной температуры" неоновой лампочки

Направляем пирометр на неоновую лампочку. Дотронувшись до лампочки рукой, убедимся, что термодинамическая температура лампочки не соответствует измеренной яркостной.

Яркостная температура: 900 °С.

Термодинамическая температура: 30-40 °С.

Различие между яркостной и термодинамической температурой неоновой лампочки объясняется тем, что её свечение имеет нетепловую природу. Неон светится из-за электролюминесценции — процесса, при котором атомы неона возбуждаются электрическим полем и испускают кванты света при возвращении в основное состояние. Это излучение имеет узкий спектр (доминирует красная линия 640 нм) и не подчиняется закону Планка для теплового излучения. Пирометр, откалиброванный на тепловые источники, интерпретирует интенсивность этого монохроматического излучения как высокую температуру, хотя реальная термодинамическая температура лампочки остаётся низкой.

Выводы

В ходе работы были успешно проведены измерения температур различных тел оптическим пирометром. Показано, что для абсолютно черного тела яркостная и термодинамическая температуры совпадают в пределах погрешности (<3%), что подтверждает корректность методики измерений. Для тел с различной излучательной способностью (керамические кольца) при одинаковой термодинамической температуре были получены разные яркостные температуры, что демонстрирует зависимость яркостной температуры от материала.

Исследование вольфрамовой нити лампы накаливания подтвердило справедливость закона Стефана-Больцмана для серого тела. Экспериментально полученное значение показателя степени $n = 4.758 \pm 0.042$ хорошо согласуется с теоретическим $n = 4$. По измеренным данным были рассчитаны постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$) и постоянная Планка ($h \approx 7 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$), которые близки к табличным значениям.

Эксперимент с неоновой лампой наглядно продемонстрировал принципиальное различие между тепловым излучением и нетепловым, при котором яркостная температура не соответствует термодинамической.