

МОСКОВСКИЙ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8.1

**Определение постоянных
Стефана-Больцмана и Планка из
анализа теплового излучения
накаленного тела**

Студент

Рагимов ИСЛАМ
618 группа

Преподаватель

Григорий Евгеньевич
ФЕДОРОРОВ



6 ноября 2018 г.

Цель работы: При помощи модели абсолютно черного тела (АЧТ) провести измерения температуры оптическим пирометром с исчезающей нитью и термопарой. Исследовать излучение накаленных тел с различной испускательной способностью. Определить постоянные Планка и Стефана-Больцмана.

Теоритический аспект

Для измерения температуры разогретых тел, удаленных 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 , цветовую и яркостную T .

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

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

Под яркостной температурой понимают температуру абсолютно черного тела, при которой его спектральная испускательная способность равна спектральной испускательной 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. Равенство видимых яркостей, наблюдаемых через монохроматический светофильтр ($\lambda = 6500 \text{ \AA}$), фиксируется по исчезновению изображения нити на фоне раскаленного тела. Яркостный метод измерения температуры основан, в соответствии с формулой Планка, на зависимости испускательной 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 раскаленного тела, а также темно-красный светофильтр ($\lambda = 6500\text{\AA}$). 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.

Шкалу прибора, измеряющего ток через нить, предварительно градуируют по абсолютно черному телу, термодинамическую температуру которого измеряют с помощью

термопары. Если тело, температуру которого определяют, излучает как абсолютно черное тело, то мы можем с помощью пирометра найти его температуру. Если же тело излучает иначе, то определенное значение температуры является яркостной температурой. Яркостная температура тела всегда ниже его термодинамической температуры. Это связано с тем, что любое нечерное тело излучает меньше, чем абсолютно черное тело при той же температуре. Чтобы получить величину термодинамической температуры тела, надо вводить дополнительные поправки, которые определяются для каждого материала экспериментально.

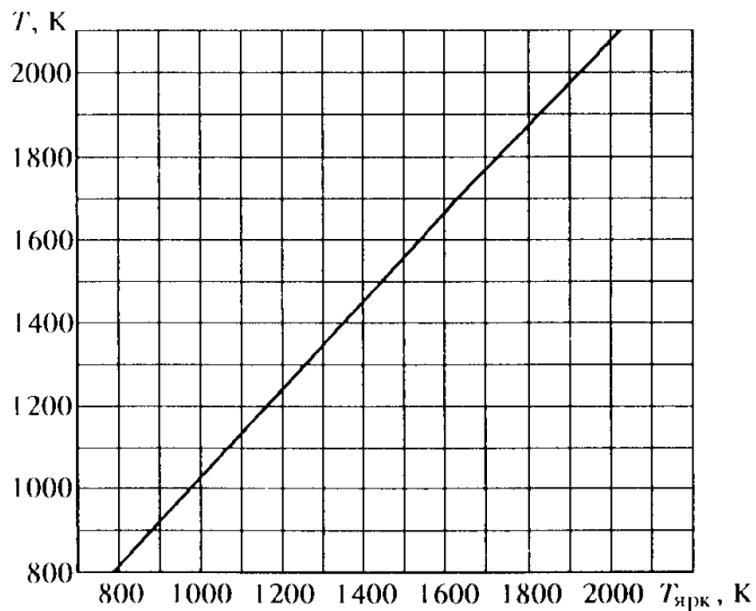


Рис. 1: График зависимости $T = f(T_{\text{ярк}})$ для вольфрама

В данной работе используется оптический пирометр с исчезающей нитью, проградуированный при изготовлении по абсолютно черному телу, так что его цифровое табло во время измерения высвечивает значение температуры накаленного тела в градусах Цельсия. Вначале с помощью модели абсолютно черного тела проверяется правильность работы пирометра, 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 термодинамической температурами вольфрама приведена на рис.??.

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:

$$W = \sigma S(T^4 - T_0^4), \quad (1)$$

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

вольфрамовая нить излучает как 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 Т.

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

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

где мы учли, что реально температура вольфрама намного выше температуры окружающей среды. Значения коэффициента излучения ε_T при различных температурах приведены в табл. 1. на рисунке ??

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 углу наклона определить показатель степени n исследуемой температурной зависимости. Понятно, что в пределах погрешности показатель степени должен быть близок к четырем.

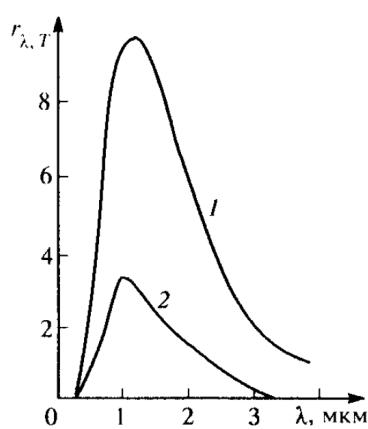


Рис. 3: Распределение энергии в спектре излучения:
1 - АЧТ
2 - Вольфрам
Температура = 2450 К

Рис. 2: Таблица 1. Поправочные коэффициенты излучения для вольфрама

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

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 особенностю 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. Рис. ?? иллюстрирует разницу между спектрами излучения абсолютно черного тела и вольфрама при температуре 2450 К.

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 π 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 π и σ соответствуют теоретическим значениям.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. ??) 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 (14, 15, 16).

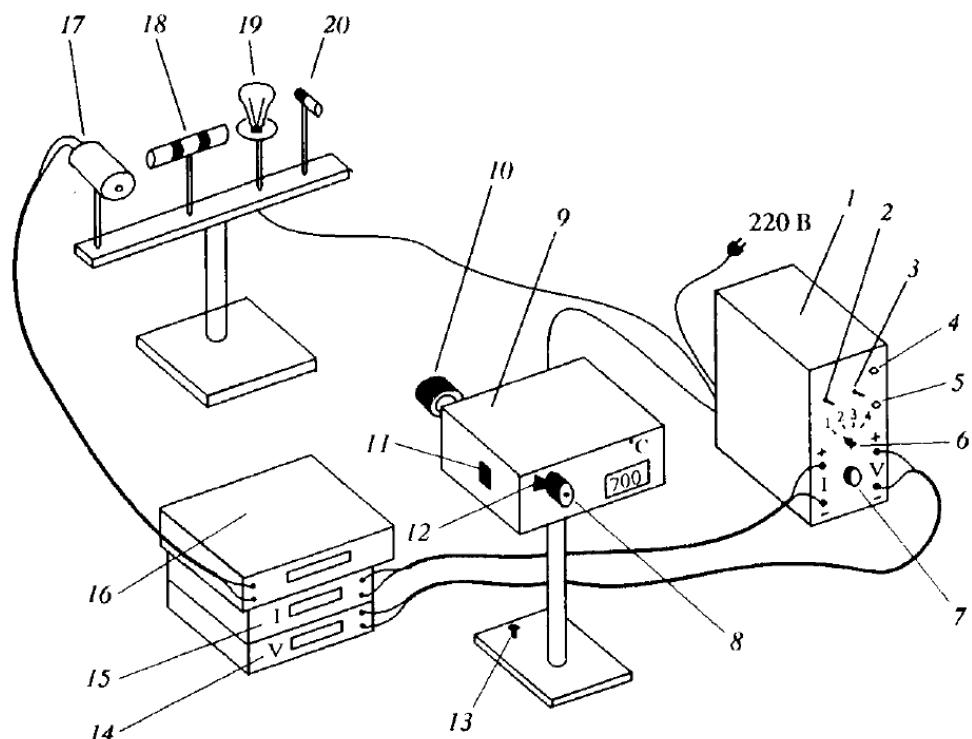


Рис. 4: Схема экспериментальной установки: 1 — блок питания; 2 — тумблер включения питания пирометра и образцов; 3 — тумблер нагрева нити пирометра: «Быстро» — вверх, «Медленно» — вниз; 4 — кнопка «Нагрев нити»; 5 — кнопка «Охлаждение нити»; 6 — тумблер переключения образцов; 7 — регулятор мощности нагрева образцов; 8 — окуляр пирометра; 9 — корпус пирометра; 10 — объектив пирометра; 11 — переключение диапазонов: 700 -1200° C — вниз, 1200—2000 ° C — вверх; 12 — сектор 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

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 накаленного исследуемого тела. Перемещение светофильтра осуществляется сектором 12. Пирометр имеет два диапазона измерений: 700—1200 ° С и 1200—2000 ° С. Переключение осуществляется введением серого светофильтра при помощи переключателя 11 «Включение». 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 никромовой спиралью, питаемой от источника тока. Полость трубы и особенно ее дно излучают практически как абсолютно черное тело. Температура модели АЧТ измеряется хромель-алюмелевой термопарой, один спай которой вмонтирован в дно трубы, 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 трубы с набором колец из различных материалов, нагреваемой изнутри никромовой 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 трубы.

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. 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

Изучение работы оптического пирометра

- С помощью пирометра измерим температуру модели АЧТ.

В данном пункте мы добивались исчезновения нити на фоне вечения дна модели АЧТ подбираю температуру двумя способами: снизу и сверху.

Полученные данные занесем в таблицу

Таблица 1: Температура АЧТ, измеренная пирометром

Значение $T_{\text{АЧТ}}$ подобранное снизу, $^{\circ}\text{C}$	Показания термопары, мВ	Значение $T_{\text{АЧТ}}$ подобранное сверху, $^{\circ}\text{C}$	Показания термопары, мВ
1083	40,84	1086	41,07
1090	41,17	1089	41,13
1086	41,03	1099	40,99

Также из полученных данных для измерения одной и той же температуры можно заключить, что ошибка в определении температуры $\Delta_T = 16^{\circ}\text{C}$

- До начала эксперимента нами было снято значение напряжения термопары для случая, когда АЧТ был в ненагретом состоянии.

$$U_{\text{термопары при нулевом питании АЧТ}} = -0,06 \text{ мВ}$$

Из устройства термопары полученные данные будут учитываться следующим образом:

$$U_{\text{действительное}} = U_{\text{термопары}} - U_{\text{термопары при нулевом питании АЧТ}},$$

Тогда для расчета значения температуры с помощью показаний термопары, мы получаем формулу:

$$T_{\text{изм.}} = [(U_{\text{термопары}} + 0,06) \cdot \alpha + 24] ^{\circ}\text{C},$$

где α - величина, полученная из графика в описании лабораторного практикума и равна:

$$\alpha = \frac{1000}{41}$$

- Таким образом, собранные нами данные перезапишутся следующим образом.

Таблица 2: Температура АЧТ, измеренная пирометром и термопарой

Значение $T_{\text{АЧТ}}$ подобранное снизу, $^{\circ}\text{C}$	Показания термопары, $^{\circ}\text{C}$	Значение $T_{\text{АЧТ}}$ подобранное сверху, $^{\circ}\text{C}$	Показания термопары, $^{\circ}\text{C}$
1083	1022	1086	1027
1090	1030	1089	1029
1086	1026	1099	1026

Таким образом по собранным данным можно установить, что в статистическом исследовании ошибка между определением температуры с помощью пирометра и термопары не превышает 7% ($\max \delta = 6,6\%$)

Измерение яркостной температуры накаленных тел

К сожалению в условиях проведения эксперимента наблюдать данное явление не представилось возможным.

Проверка законов Стефана-Больц

- Постепенно увеличивая при помощи ручки 7 накал нити лампы, начиная со слабого темно-красного накала ($\sim 900^{\circ}\text{C}$) вплоть до 1900°C , измерим пирометром яркостную температуру нити через каждые 100°C . При каждом измерении температуры запишем также величину тока и падения напряжения на нити лампы.

(Замечание: При измерении температуры выше 1400°C необходимо переместить переключатель диапазонов 11 вверх — на $1200—2000^{\circ}\text{C}$.)

Собранные данные запишем в таблицу:

Таблица 3: Данные для проверки закона Стефана-Больцмана

$T_{\text{пирометра}}, ^\circ C$	I, A	U, В
900	0,5	1,95
1000	0,504	1,98
1100	0,536	2,27
1200	0,714	4,09
1300	0,722	4,2
1400	0,802	5,14
1500	0,842	5,62
1600	0,858	5,84
1700	0,899	6,39
1800	0,967	7,34
1900	1,079	9,02

2. Для каждого значения измеренной яркостной температуры найдем термодинамическую температуру вольфрамовой нити лампы, пользуясь графиком ??, где T - абсолютная температура.

Также вычислим для каждого значения термодинамической температуры мощность, потребляемую нитью лампы.

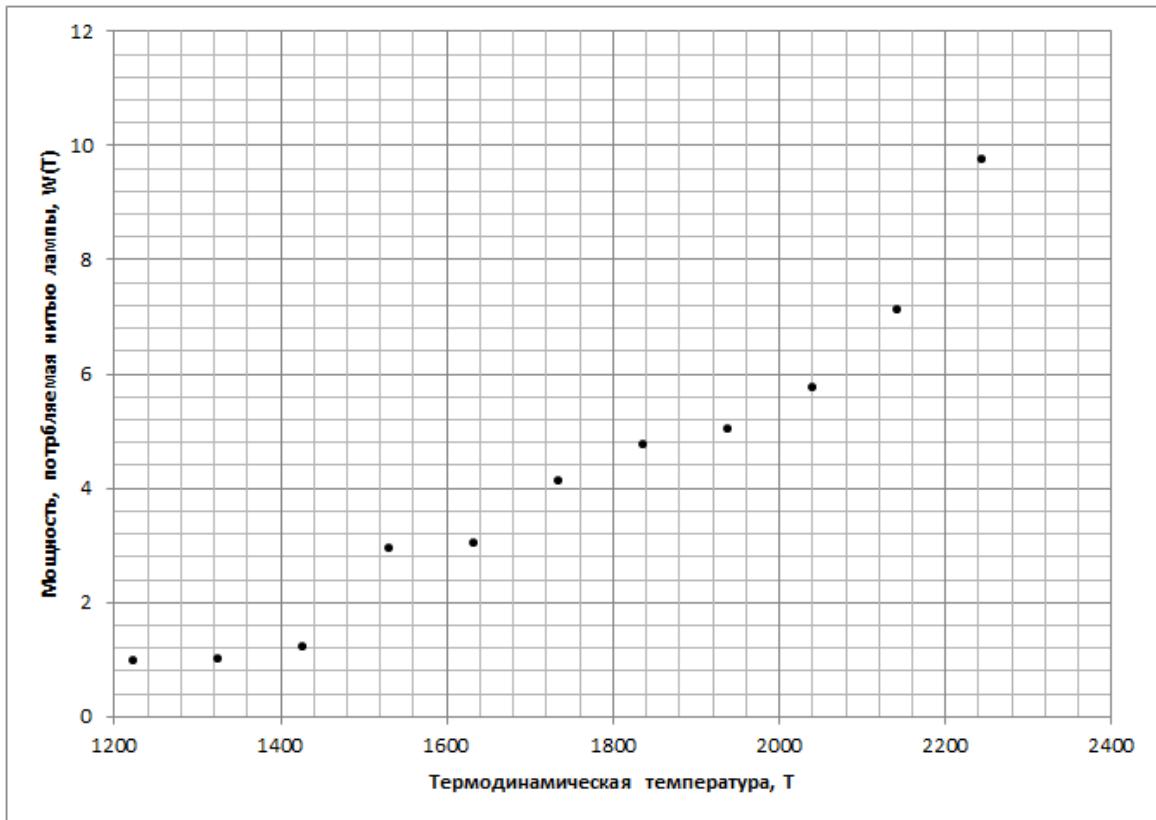
Полученное значение занесем в таблицу:

Таблица 4: Таблица для построения графика $W = f(T)$

$T_{\text{абсолютная}}, \text{К}$	1225	1327	1429	1531	1633	1735	1837	1939	2041	2143	2245
$W(\text{мощность}), \text{Вт}$	0,975	0,99792	1,21672	2,92026	3,0324	4,12228	4,73204	5,01072	5,74461	7,09778	9,73258

Представим результаты в виде графика:

Рис. 5: Зависимость мощности, потребляемой нитью лампы от значения термодинамической температуры



По данным таблицы ?? потроим график зависимости

3. Для проверки закона Стефана - Больцмана построим в логарифмическом масштабе график зависимости:

$$W = \varepsilon_T B T^n$$



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

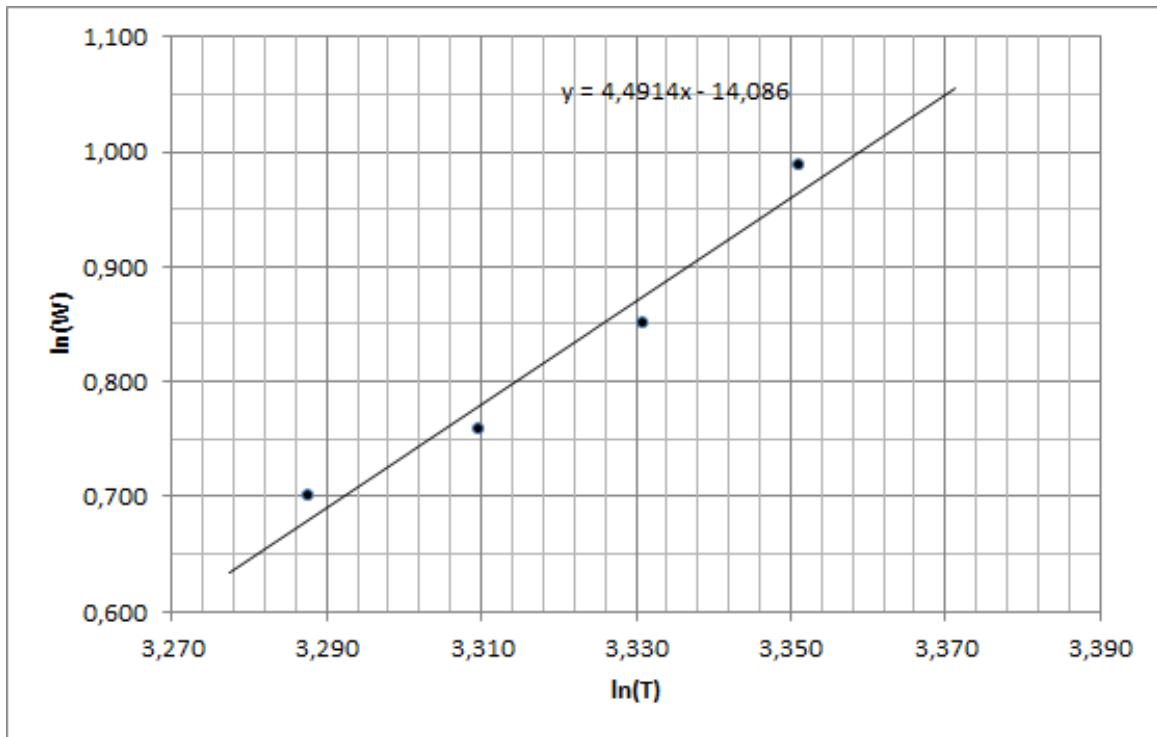
Тогда данные перезапишутся следующим образом:

Таблица 5: Таблица для построения графика $\ln(W) = a + b \cdot f(T)$

$\ln(T_{\text{абсолютная}})$	2,964	3,011	3,053	3,093	3,130	3,163	3,193	3,221	3,248	3,274	3,298
$\ln(W)$	-0,011	-0,001	0,085	0,465	0,482	615	0,675	0,700	0,759	0,851	0,988

В описании к лабораторной работе рекомендовано проводить исследование в области высоких температур. Таким образом в построении графика, последующей аппроксимации его прямой и получении уравнения зависимости будут участвовать только последние 4 точки из таблицы:

Рис. 6: Зависимость логарифма мощности, потребляемой нитью лампы от значения логарифма термодинамической температуры



Таким образом полученная зависимость аппроксимируется по методу наименьших квадратов прямой:

$$\ln(W) = 4,49 \cdot \ln(T) - 14,08$$

Найдем ошибку в определении значения n с помощью формулы для погрешности коэффициентов аппроксимации МНК:

$$\sigma_n = 1,35$$

$$n = 4,49 \pm 1,35$$

Таким образом с учетом погрешности мы получили значение n равное 4, что подтверждает теорию изложенную в лабораторном практикуме.

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

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

где значение $S = 0,36 \text{ см}^2$, значение ε_T для каждого значения температур возьмем из Таблицы 1 рис. ??.

Запишем рассчитанные величины в таблицу:

Таблица 6: Значение величины постоянной Стефана - Больцмана

T, K	1735	1837	1939	2041	2143	2245
ε_T	0,441	0,439	0,437	0,435	0,433	0,431
W, Вт	4,12228	4,73	5,01	5,74	7,10	9,73
$\sigma \cdot 10^{-12}$, Вт/см ² К ⁴	2,87	2,63	2,25	2,11	2,16	2,47

5. Теперь зная величину σ мы можем оценить величины постоянной Планка из формулы:

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

Полученные значения для каждой σ выпишем в таблицу:

$h \cdot 10^{-34}$, Дж·с	8,31	8,56	9,01	9,20	9,14	8,74
$\sigma \cdot 10^{-12}$, Вт/см ² К ⁴	2,87	2,63	2,25	2,11	2,16	2,47

6. оценим точность с которой мы получили каждое из значений σ и h по следующим формулам:

$$\Delta_\sigma = 4\Delta_T \cdot \frac{W}{\varepsilon_T S T^5}$$

$$\Delta_\sigma = \frac{4\Delta_T}{T} \cdot \sigma \quad (3)$$

Аналогично:

$$\Delta_\sigma = \frac{1}{3} \cdot \frac{\Delta\sigma}{\sigma} \cdot h \quad (4)$$

Выпишем по данным формулам ошибку для каждого измеренного h и σ и занесем в таблицу:

h	8,31	8,56	9,01	9,2	9,14	8,74
Δh	0,102	0,099	0,099	0,096	0,091	0,083
σ	2,87	2,63	2,25	2,11	2,16	2,47
$\Delta\sigma$	0,106	0,092	0,074	0,066	0,065	0,070

К сожалению ни одно из полученных значений не равно табличным даже с учетом погрешности. Ведь средняя погрешность не превышает проводимого эксперимента не превышает 5%, когда значения разняться с табличными на величины порядка 30%. Это говорит о том, что в проведенном опыте имеет место какая-то систематическая ошибка. Дальнешее рассмотрение полученных величин не имеет смысла.

0.1. Измерение "яркостной температуры" неоновой лампочки

При максимальной подаче напряжения на неоновую лампочку показания пирометра составили 925°C . Однако, дотронувшись до лампочки, мы, превозмогая страх, убедились в том, что термодинамическая температура не совпадает с измеренной.

Вывод

Проделав эксперименты представленные в лаборатории, мы убедились в достоверности того факта, что излучение нагретых тел пропорционально четвертой степени их температуры. Однако полученные значения константных величин не совпали с табличными. Причиной данных расхождений могут служить следующие факторы: 1) Не учтена ошибка субъективного восприятия. 2) У вольфрама максимум плотности энергии излучения смещён по длине волн, поэтому при снятии значения со светофильтра возможно появление систематическая ошибки. Что мы и наблюдали в эксперименте, ведь все полученные значения систематически отклонялись от табличного на приблизительно одну величину.

Что касается несоответствия яркостной и термодинамической температур неона, я считаю: Неон - прозрачный газ, следовательно его коэффициент отражения равен нулю, поэтому из закона Стефана-Больцмана следовало бы, что неон вообще не должен излучать (если тело не является АЧТ или серым). Но неон излучает, так как не описывается моделью АЧТ и серого тела, которая предполагает, что излучение порождается только лишь преобразованием термодинамической температуры тела в излучение, так как неон может преобразовывать в излучение не только термодинамическую температуру, но и энергию возбужденного состояния атомов.