

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1.

# Измерение температуры пламени методом обращения спектральных линий.

ВЫПОЛНИЛИ:

Рогозин Владимир  
Герасимов Илья  
Кравец Кирилл  
Казусев Степан  
Дюгаева Юлия

Долгопрудный, 2023 г.

**Цель работы:** изучение процессов теплообмена между пламенем пропановой горелки и металлической пластины, внесённой в пламя.

**В работе используются:** пирометр ЛОП-72, горелка, горючее, компрессор, фитилёк, смоченный раствором поваренной соли, фотометрическая лампа.

### Методика измерения:

В данной лабораторной работе измерения температуры проводятся двумя способами:

- а) пирометрическим, с помощью которого измеряется температура раскалённых металлов,
- б) методом обращения спектральных линий, с помощью которого определяется температура пламени пропановой горелки.

## Теоретические сведения

Введём понятие спектральной интенсивности излучения  $I_\lambda dS dt d\lambda d\Omega$  - количество энергии, переносимой излучением через площадку единичной площади, нормаль которой совпадает с направлением распространения излучения, за единицу времени, в единичном спектральном интервале длин волн, в единичном телесном угле.

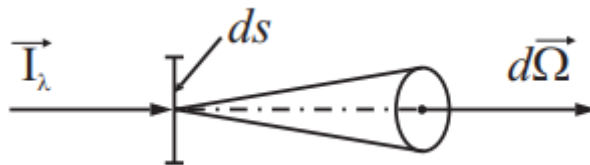


Рис. 1: К понятию интенсивности излучения

В случае изотропного (диффузного) излучения с поверхности  $dS$  энергия, излучаемая за время  $dt$  внутри телесного угла  $d\Omega$  в интервале волн  $d\lambda$  равна:

$$dU = E_\lambda(T) \cos(\phi) d\lambda dS d\Omega dt - \text{закон Ламберта} \quad (1)$$

Для вычисления полного количества энергии, излучаемой элементом диффузной поверхности используют соотношение:

$$\frac{dU}{dt} = K_\lambda(T) dS d\lambda = \pi E_\lambda(T) dS d\lambda, \quad (2)$$

Где  $K_\lambda(T)$  иногда называют полусферической спектральной поверхностной плотностью излучения. Соотношение (2) показывает, что полная испускаемая энергия, испускаемая элементов поверхности  $dS$ , в  $\pi$  раз больше энергии, излучаемой им в направлении нормали к поверхности в пределах единичного телесного угла.

Рассмотрим падение излучения  $I_\lambda^0$  на произвольное тело.

Часть этого излучения может поглотиться телом  $I_\lambda^A$ , часть - отразиться  $I_\lambda^R$ , а часть - пройти сквозь тело без изменения  $I_\lambda^D$ .

Из закона сохранения энергии:

$$I_\lambda^0 = I_\lambda^R + I_\lambda^A + I_\lambda^D. \quad (3)$$

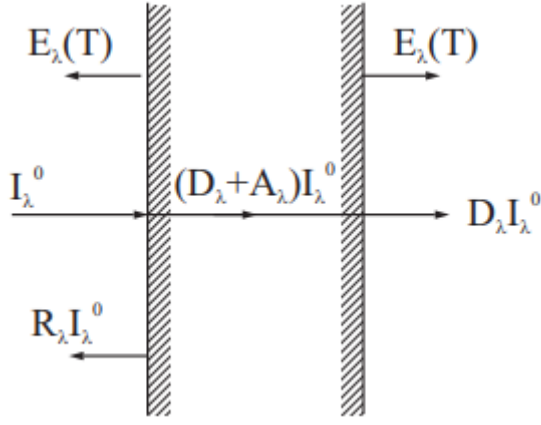


Рис. 2: Различные процессы, связанные с излучением.

Введём следующие понятия:

$$R_\lambda = \frac{I_\lambda^R}{I_\lambda^0} - \text{спектральная отражательная способность} \quad (4)$$

$$A_\lambda = \frac{I_\lambda^A}{I_\lambda^0} - \text{спектральная поглощательная способность} \quad (5)$$

$$D_\lambda = \frac{I_\lambda^D}{I_\lambda^0} - \text{спектральная пропускательная способность} \quad (6)$$

$$R_\lambda + A_\lambda + D_\lambda = 1. \quad (7)$$

Тело, которое полностью поглощает падающее на него излучение произвольной частоты, называется абсолютно чёрным телом. Для него  $A_\lambda = 1$ . Для любого вещества отношение лучеиспускательной способности к поглощательной одинаково для всех веществ и равно спектральной интенсивности чёрного излучения  $B_\lambda(T)$ .

$$\frac{E_\lambda(T)}{A_\lambda} = B_\lambda(T) - \text{закон Кирхгофа.} \quad (8)$$

Для абсолютно чёрного тела интенсивность излучения равна интенсивности теплового равновесного излучения при одинаковой температуре.

$$E_\lambda(T) = B_\lambda(T) \quad (9)$$

Функция  $B_\lambda(T)$  одинакова для всех веществ:

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} - \text{закон распределения Планка} \quad (10)$$

$c$  - скорость света в вакууме,  $h$  - постоянная Планка,  $k$  - постоянная Больцмана.

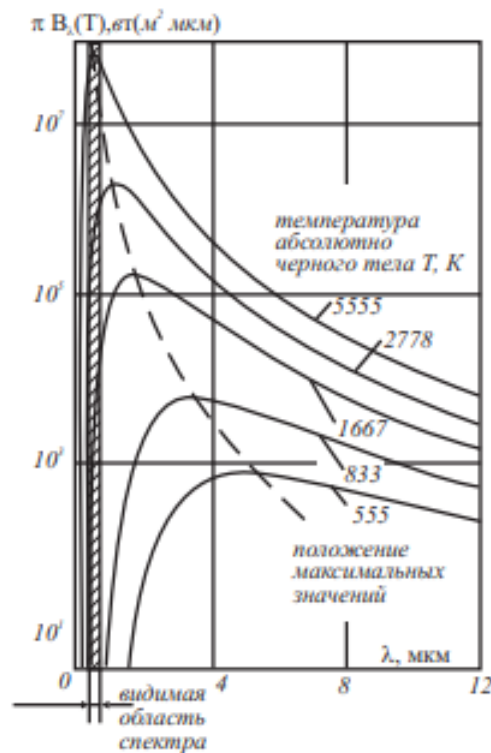


Рис. 1.5: Зависимость спектральной полусферической плотности излучения черного тела  $\pi B_{\lambda}(T, \lambda)$  от длины волны для нескольких значений температур.

Рис. 3

Из закона распределения Планка следует закон Стефана-Больцмана:

$$N_s(T) = \sigma_s T^4, \text{ где } \sigma_s = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4 \quad (11)$$

Введём величину  $\varepsilon_{\lambda}(T)$ , называемую степенью черноты тела:

$$\varepsilon_{\lambda}(T) = \frac{U_s \text{ (истинная)}}{U_s \text{ (Стефан-Больцман)}} = \frac{E_{\lambda}(T)}{B_{\lambda}(T)} \quad (12)$$

где  $U$  обозначает физическую величину энергии, проходящей через площадку за единицу времени.

В данной лабораторной работе будет рассматриваться степень черноты в направлении нормали, которая по закону Кирхгофа совпадает с определением поглощательной способности:

$$\varepsilon_{\lambda,n}(T) = A_{\lambda}(T). \quad (13)$$

## Экспериментальная установка

Пирометры - приборы, используемые для исследования излучения раскалённого объекта. Работа пирометра основана на сравнении интенсивности света, излучаемого, с одной стороны, объектом и, с другой стороны, фотометрической лампой накаливания.

### Принцип измерения с исчезающей нитью

Принцип устройства пирометра с исчезающей нитью представлен на рисунке 4.

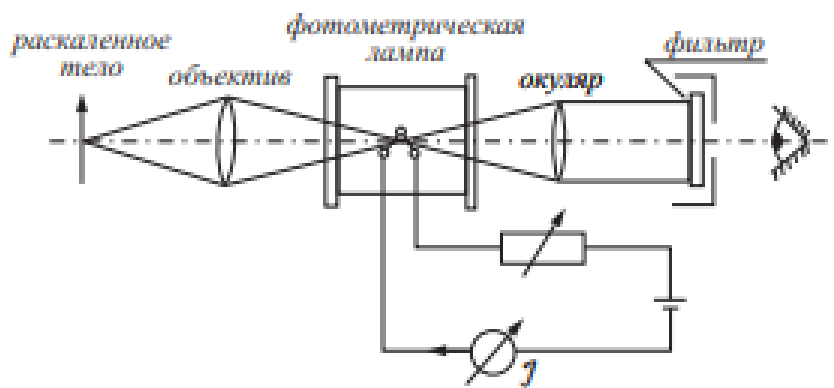


Рис. 4

Фильтр пропускает свет с длиной волны  $\lambda$  в интервале длин волн  $\Delta\lambda$ . Изображение части светящейся поверхности тела и нити лампы наблюдается одновременно с помощью окуляра. Значение тока  $J$ , соответствующее равенству интенсивностей излучения нити и изображения, позволяет измерить температуру тела с использованием предварительной калибровки прибора по черному телу.

Параметры градуируются по излучению чёрного тела.

Далее можно получить соотношение для истинной температуры тела.

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_b} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \bar{\epsilon}_{\lambda,n} \quad (14)$$

Где  $T_b$  - яркостная температура (температура излучаемого тела = температуре абс. чёрного тела с тем же тепловым излучением).  $\bar{\epsilon}_{\lambda,n}$  - среднее значение степени черноты нагретого тела, меньше единицы.

#### Принцип измерения методом обращения спектральных линий

Схема измерения температуры пламени методом обращения спектральных линий приведена на рис.5.

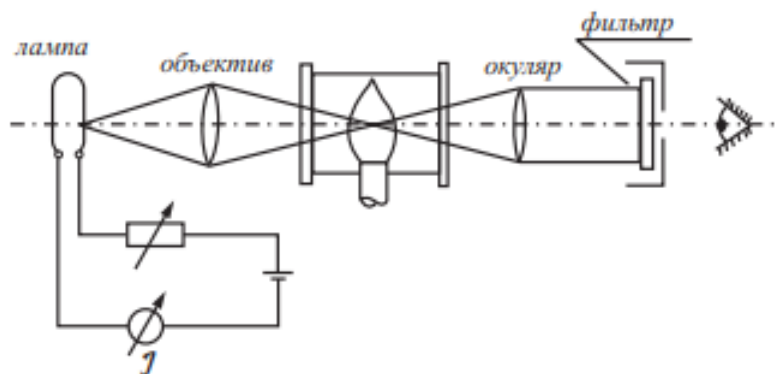


Рис. 5

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Вне желтой линии} & & \text{Внутри желтой линии} \\
 B_{\lambda}(T_b) & = & B_{\lambda}(T_b)e^{-k_{\lambda}L} + (1 - e^{-k_{\lambda}L})B_{\lambda}(T) \\
 \boxed{\text{интенсивность}} & & \boxed{\text{Интенсивность}} \quad \boxed{\text{собственная}} \\
 \boxed{\text{излучения фона}} & & \boxed{\text{излучения фона,}} \quad \boxed{\text{интенсивность}} \\
 & & \boxed{\text{ослабленная}} \quad \boxed{\text{излучения}} \\
 & & \boxed{\text{пламенем}} \quad \boxed{\text{пламени}}
 \end{array}$$

Рис. 6

$T_b$  - яркостная температура лампы,  $T$  - температура пламени,  $k_{\lambda}$  - спектральный коэффициент поглощения пламени при температуре  $T$ ,  $L$  - толщина излучающего слоя пламени.

Из (6) следует:  $B_{\lambda}(T_b) = B_{\lambda}(T)$ ,  $T_b = T$ .

То есть если осуществляется баланс интенсивностей, то температура пламени равна яркостной температуре фотометрической лампы.

В реальных измерительных системах фильтр заменяется монохроматором. Излучение пламени и лампы просвечивания фокусируется на входную щель монохроматора, и после прохождения через диспергирующий элемент внутри монохроматора на выходе наблюдают спектр. Увеличивая ток через лампу можно наблюдать, что яркие вначале по отношению к фону линии затем наоборот станут темнее фона. От этого и идёт название метода - метод обращения спектральных линий.

## Ход работы

1. Соберём схему для измерения температуры пламени методом обращения спектральных линий.
2. Зажжём горелку. Регулируя подачу горючего добьёмся устойчивого пламени. Регулируя поступление воздуха, добьёмся устойчивого пламени. Внесём в пламя фитилёк, смоченный раствором поваренной соли.
3. Добьёмся чёткой видимости свечения резонансных линий натрия в окуляре монохроматора ( $\lambda_{Na} = 0.5890; 0.5896$  мкм).
4. Изменяя величину электрического тока через фотометрическую лампу, добьёмся исчезновения линий натрия на фоне изображения ленты фотометрической лампы.
5. С помощью пирометра определим яркостную температуру лампы. В таблице приведены значения тока  $I$ , соответствующего равенству интенсивностей излучения нити и изображения для различных наблюдателей.  $I'$  - ток лампы пирометра.

№	$I$ , А	$I'$ , А
1	17.6	0.345
2	17.6	0.345
3	17.8	0.345
4	18.1	0.35
5	18.0	-

Среднее значение  $I$  выборки из 5-ти опытов соответствует:

$$I = 17.82 \pm 0.2A. I' = 0.345 \pm 0.04A; \quad (15)$$

Следовательно  $T_b = (1900 \pm 25)$  К. (участок II на графике (7), т.к. использовали фильтр-поглотитель)

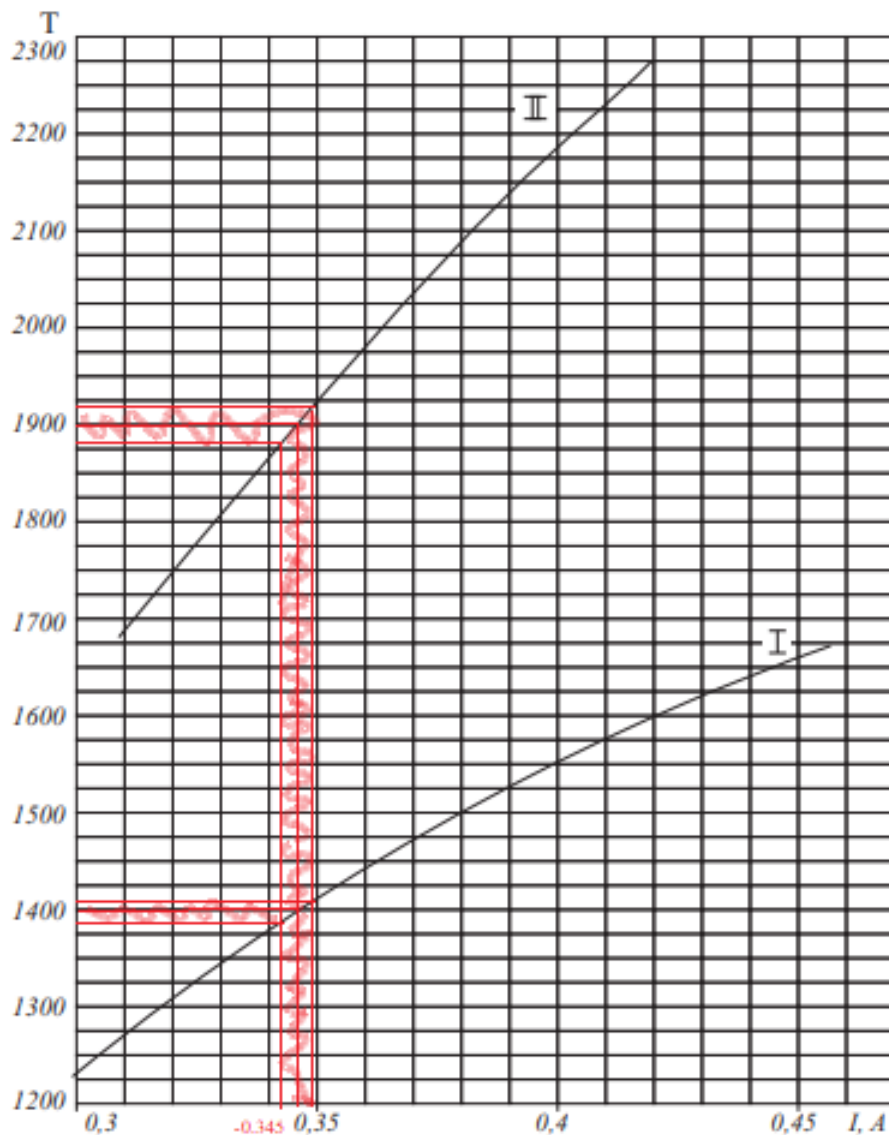


Рис. 7: Калибровочные кривые для определения яркостной температуры

Найдём значение степени черноты в направлении нормали для исследуемой вольфрамовой нити по графику зависимости полусферической степени черноты вольфрама  $\varepsilon_\lambda(T)$  от длины волны  $\lambda$  и температуры поверхности  $T$  К. За длину волны излучения вольфрамовой нити приняли  $\lambda = 0.5890$  мкм.

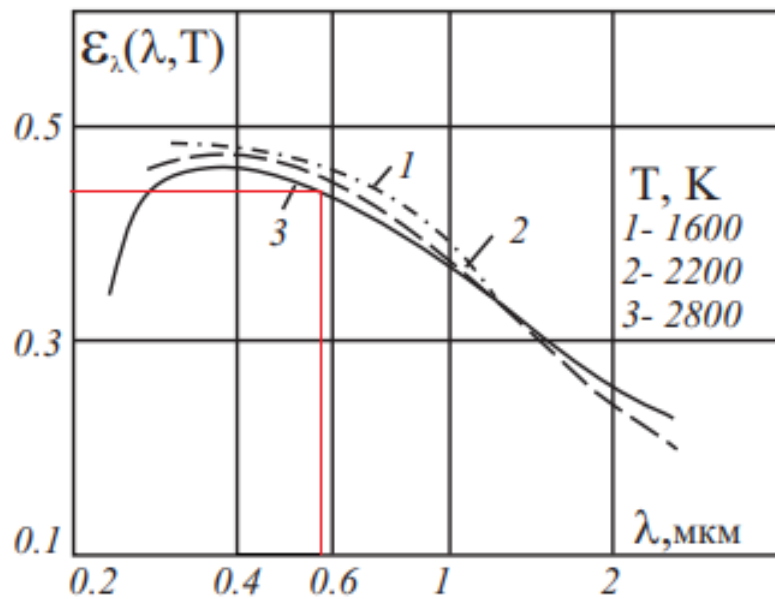


Рис. 1.12: Зависимость полусферической спектральной степени черноты вольфрама  $\varepsilon_\lambda(T)$  от длины волны  $\lambda$  и температуры поверхности  $T$  К.

Рис. 8

$$\varepsilon_{\lambda,n} = 0.44 \pm 0.3 \quad (16)$$

Найдем истинную температуру пламени:

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_b} + \frac{\lambda}{0.0144} \ln(0.44)} = 2029 \pm 30 \text{ K}. \quad (17)$$

## Выводы

В монохроматоре был получен различимый дуплет линий спектра жёлтого дуплета натрия. С помощью значений тока на пирометре и тарировочной кривой были получены яркостная температура лампы накаливания ( $1900 \pm 25$  К) и истинная температура пламени ( $2029 \pm 30$  К). По теории сходится то, что истинная температура должна быть выше, чем яркостная температура.