

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.09

ИЗМЕРЕНИЕ ЯРКОСНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЛЬФРАМА ОПТИЧЕСКИМ ПИРОМЕТРОМ ЛОП – 72

3.1 Цель работы

Целью данной работы является изучение законов теплового излучения, ознакомление с устройством и принципом действия оптического пирометра ЛОП – 72 и измерение с его помощью яркостных температур нагретого тела по тепловому излучению в видимой области спектра.

3.2 Краткая теория

Как известно из опыта, нагретые тела являются источниками электромагнитного излучения. Тепловым излучением называется электромагнитное излучение тела, которое обусловлено возбуждением атомов и молекул тела вследствие их теплового движения. Интенсивность теплового излучения и его спектральный состав зависят от температуры и агрегатного состояния тела. Все нагретые твердые и жидкие тела дают сплошной спектр излучения (в спектре присутствуют волны всех частот). Энергия, излучаемая единичной площадкой за единицу времени по всем направлениям, называется энергетической светимостью R_3 . Тело называется абсолютно чёрным, если поглощает всё падающее на него излучение. Согласно закону Стефана-Больцмана, энергетическая светимость абсолютно

чёрного тела пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры:

$$R_{\ominus} = \sigma \cdot T^4, \quad (3.1)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Все реальные тела не являются абсолютно чёрными т. к. они поглощают не всё падающее на них излучение, часть отражают. Такие тела называются серыми. В этом случае энергетическая светимость R_c серого тела также пропорциональна четвёртой степени абсолютной температуры тела, но, она меньше, чем энергетическая светимость R_{\ominus} абсолютно чёрного тела при той же температуре:

$$R_c = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (3.2)$$

где $\varepsilon = R_c/R_{\ominus} \leq 1$ – называется интегральной степенью черноты серого тела. Излучения состоит из волн различных частот. Обозначим поток энергии испускаемой единицей площади поверхности нагретого абсолютно чёрного тела в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, через dR_{\ominus} . Тогда

$$dR_{\ominus} = r(\lambda, T) \cdot d\lambda, \quad (3.3)$$

где $r(\lambda, T)$ называется спектральной плотностью энергетической светимости т. е. эта величина, численно равная энергии излучаемой нагретым телом с единицы площади поверхности в единицу времени по всем направлениям в единичном интервале длин волн.

Зависимость $r(\lambda, T)$ имеет вид:

$$r(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}, \quad (3.4)$$

Выражение (3.4) носит название формулы Планка. Макс Планк получил её в 1900г в предположении, что энергия излучается и поглощается определёнными порциями – квантами.

Спектральная плотность энергетической светимости чёрного тела растёт на всех длинах волн, причем максимальное значение её смещается в сторону коротких волн (рис. 3.1). положение максимума определяется законом смещения В. Вина:

$$\lambda_{\max} \cdot T = b, \quad (3.5)$$

где b – постоянная Вина равная $2,8978 \cdot 10^{-3}$ м·К.

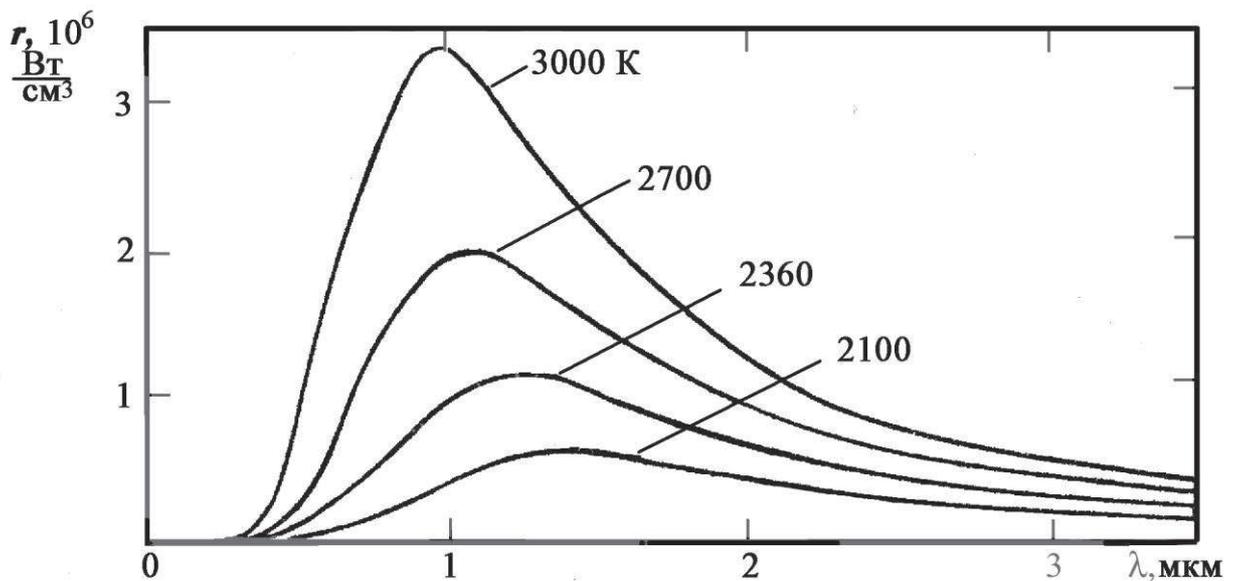


Рис.3.1. Излучение чёрного тела при различных температурах

Энергетическая светимость характеризует излучение света данным местом поверхности по всем направлениям. Для характеристики излучения (отражения) света в заданном направлении служит яркость L . Направление можно задать углом i , отсчитываемым от внешней нормали n к излучающему элементу поверхности ΔS . Выделим пучок, опирающийся на элемент поверхности ΔS и образующий телесный угол $d\Omega$, ось пучка составляет угол i с нормалью n к ΔS . Видимая поверхность элемента в направлении оси будет равна $\Delta S \cdot \cos(i)$. Пусть поток энергии, посылаемый ею в телесный угол $d\Omega$, равен $d\Phi$ тогда:

$$L = \frac{d\Phi}{\Delta S \cdot \cos(i) \cdot d\Omega}. \quad (3.6)$$

Итак, яркостью в данном направлении называется поток, посылаемый в данном направлении единицей видимой поверхности внутри единичного телесного угла. За единицу яркости в международной системе единиц (СИ) принимается кандела на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$). Кандела – единица силы света – является одной из основных единиц. Ее значение принимается таким, чтобы яркость полого излучателя при температуре затвердевания платины была равна $60 \text{ кд на } 1 \text{ см}^2$

Законы теплового излучения позволяют в качестве характеристики серого тела, наряду со степенью черноты ввести понятие яркостной температуры. Яркостной температурой называется температура абсолютно черного тела, при которой его спектральная плотность энергетической светимости $r(\lambda, T_{\text{я}})$ для монохроматического света с длиной волны λ , равна спектральной плотности энергетической светимости $r_c(\lambda, T)$ серого тела, т. е.:

$$r(\lambda, T_y) = r_c(\lambda, T). \quad (3.7)$$

3.3 Выполнение работы

3.2.1 Необходимые приборы: пирометр ЛОП – 72 со стабилизированным источником питания (СИП), лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), эталонные резисторы, электрическая лампа в кожухе, вольтметр цифровой(ВЦ).

3.3.2 Описание экспериментальной установки

Общий вид измерительной установки представлен на рис.3.2. В предлагаемой работе измерительная схема собрана заранее и разборке не подлежит. Напряжение с автотрансформатора 1 подается на лампу накаливания импакт542. Измерения проводятся при трех различных значениях напряжений. Этим значениям соответствуют три положения ручки регулятора напряжения (на ЛАТРе обозначено цифрами 1, 2 и 3). В каждом из этих положений нить лампы имеет различную яркость. Оптический пирометр 6 предназначен для измерения яркостных температур нагретых тел по их тепловому излучению в видимой области спектра при $\lambda = (0,65 + 0,01)$ мкм. Пирометр построен по классической схеме монохроматического пирометра с исчезающей нитью накала. Работа пирометра основана на измерении монохроматической яркости излучения нагретого объекта путем уравнивания ее с яркостью эталона. В качестве эталона яркости в пирометре ЛОП–72 используется пирометрическая лампа, для которой известна зависимость

соответствующее увеличению тока накала пирометрической лампы.

Пирометр установлен на подставке 1. Опора 15 с регулятором

Конструкция оптического пирометра

Рис.3.3

высоты позволяет плавно наклонять оптическую ось в пределах 3° . Поворотом ручки 1 пирометр перемещается в вертикальном направлении в пределах 100 мм, а ручкой 5 фиксируется в выбранном положении. Ослабляя ручку 4, можно наклонить пирометр или повернуть в горизонтальной плоскости вручную. Во избежание поломки пирометра его установку проводят в присутствии преподавателя или лаборанта. Все измерения производятся одним цифровым вольтметром 4 (см. рис. 3.1).

Коммутация сигналов производится переключателем 3. Положение 1 – 4 соответствует режиму измерения переменных напряжений, а положение 2 – 5 режиму измерения переменных токов на лампе накаливания 2. Поэтому на вольтметре надо установить соответствующий режим:

“Измерение переменного напряжения” – (“~ U”).

В положении 3 – 6 измеряется постоянное напряжение, равное току пирометрической лампы. В этом случае на цифровом

вольтметре следует установить режим: “*Измерение постоянного напряжения*” – (“= U”).

3.3.3 Порядок выполнения работы

Проверьте, подключено ли заземление цифрового вольтметра, лабораторного автотрансформатора и источника питания пирометра.

Установите ручку регулятора напряжения ЛАТР в положение 0. Ручки реостатов 12 и 13 (см. рис. 3.3.) установите в положение, соответствующее минимуму тока накала пирометрической лампы. Включите в сеть 220В автотрансформатор, источник питания пирометра и цифровой вольтметр, дайте прогреться в течении 5 минут

Установите переключатель S1 (см. рис. 3.2) в положение 3–6.

Цифровой вольтметр перевести в режим измерения постоянного напряжения «= U». Предел измерения «1», входные клеммы 0–100VR

Установите ручку регулятора напряжения автотрансформатора в положение 1.

Установите ручку светофильтров 3 (см. рис. 3.3) в положение 2 в зависимости от яркости объекта, а рычаг поглотителей 2 – в положение 2 (для опытов 1 и 2). Для опыта 3 светофильтр и поглотитель – в положении 3.

Положения рычагов поглотителей в зависимости от температуры объекта.

Диапазоны измеряемых температур	Положения рычагов поглотителей
От 900 до 1400 включительно	1
От 1400 до 2000 включительно	2
От 2000 до 3000 включительно	3

Вращением ручки реостата 12 увеличьте ток в цепи пирометрической лампы до видимого свечения нити лампы.

Добейтесь четкого изображения нити пирометрической лампы перемещением окуляра.

Вращением зрительной трубы 7 наведите пирометр на исследуемый объект (спираль лампы накаливания). Наводка производится только в присутствии преподавателя или лаборанта. При правильно установленном пирометре нить накала пирометрической лампы должна наложиться на участок спирали лампы накаливания.

Подготовить вольтметр к измерению переменного напряжения, для этого поставить переключатель пределов измерений в положение 1000V, проводники с клемм 0–100VR перевести на клеммы 0–1000V вольтметра.

Установить S1 в положение 1–4.

Вращая ручки реостатов 12 и 13 грубой и тонкой регулировки накала нити пирометра, произведите уравнивание яркости нити накала пирометрической лампы с яркостью исследуемого объекта.

Запишите показания вольтметра, соответствующие току накала пирометрической лампы. Для уменьшения субъективной погрешности проведите три таких измерения (разными наблюдателями) и вычислите среднее из них. Полученные значения тока пирометрической лампы и средние значения занесите в Таблицу 3.2.

Цифровой вольтметр переведите в режим « $\sim U$ » – измерение переменного напряжения (предел 1, входные клеммы 0–100VR).

Измерьте ток I . Для этого запишите показания цифрового вольтметра, устанавливая переключатель $S1$ в положение 2-5 соответственно. Данные занесите в таблицу 3.2.

Проделайте аналогичные измерения ещё два раза, установив ручку регулятора напряжения автотрансформатора в положении 2 и 3. Второй опыт можно сделать в обратном порядке: $\sim U$; $\sim I$; $= I$.

Результаты измерений

Номер опыта	$I_{\text{пир}}, \text{A}$	Среднее значение $I_{\text{пир}}, \text{A}$	$\sim I, \text{A}$	$\sim U, \text{B}$	$T_{\text{яр}}, \text{K}$
1					
2					
3					

По графику зависимости $T_{\text{яр}} = f(I_{\text{пир}})$ определите значения яркостной температуры $T_{\text{яр}}$ объекта для каждого из трёх опытов. Данные запишите в таблицу 3.2

3.2.4 Вычисление абсолютной температуры объекта

Абсолютную температуру вычислим по измеренным току и напряжению (I и U) предположив, что вся подводимая к лампе накаливания энергия идет на излучение (доля этой энергии, хотя и незначительная, расходуется на нагревание окружающего лампы воздуха), т.е.

$$R_c = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 = \frac{U \cdot I}{S}, \quad (3.8)$$

Здесь S – площадь поверхности нити лампы накаливания, – интегральная степень черноты материала спирали (вольфрама). Данные о площади спирали и ее степени черноты приведены на лабораторном столе. $S = 1,16 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$

Для абсолютной температуры из (3.8.) получается выражение:

$$T = \sqrt[4]{\frac{U \cdot I}{\varepsilon \cdot \sigma \cdot S}}, \quad (3.9)$$

Для каждого опыта рассчитайте значения абсолютной температуры, используя приведенные на лабораторном столе данные о степени черноты вольфрама и площади нити накаливания лампы.

3.2.5 Вычисление погрешностей

Абсолютные погрешности абсолютной температуры и яркостной температуры находятся по формулам:

$$\Delta T = E_T \cdot T, \quad \Delta T_{\text{яр}} = E_{T_{\text{яр}}} \cdot T_{\text{яр}}, \quad (3.10)$$

где $E_{T_{\text{яр}}} = 0,015$ (определена в паспорте прибора).

Относительная погрешность определения абсолютной температуры рассчитывается из соотношения:

$$E_T = \frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} \right), \quad (3.11)$$

Приборные погрешности ΔU и ΔI приведены на лабораторном столе. Данные о полученных значениях абсолютных и яркостных температур и их погрешностях занесите в таблицу 3.3, сравните результаты, сделайте вывод.

Таблица (3.3)

Результаты расчетов средних значений и погрешностей

№ опыта	$T \cdot 10^4$	ΔT	$T_{\text{яр}}$	$\Delta T_{\text{яр}}$
1				
2				
3				

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Что называется абсолютно черным телом?
2. Как определяется яркость нагретого тела, от чего она зависит?
3. Дайте определение яркостной температуры.
4. Сформулируйте закон Стефана – Больцмана.
5. Как определяется спектральная плотность энергетической светимости?
6. Сформулируйте закон смещения Вина.
7. Назовите единицы измерения энергетической светимости и спектральной плотности энергетической светимости.
8. Задача: Мощность излучения абсолютно черного тела равна 30 кВт. Найти температуру этого тела, если известно, что площадь его поверхности равна $0,6 \text{ м}^2$.
9. Задача: Диаметр вольфрамовой спирали в электрической лампочке равен 0,3 мм, длина спирали 5 см. При включении лампочки в цепь напряжением 127 В через нее течет ток силой 0,31 А. Найти температуру лампочки. Отношение энергетической светимости вольфрама и абсолютно черного тела считать для этой температуры равным 0,31.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И.В. Курс общей физики.Т.3. –М.: Наука, 1982.- 304 с.
2. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики.Т3. –М.: Наука, 1972. – 496с.
3. Пирометр оптический ЛОП – 72. Паспорт. – Харьков: Облграфиздат, 1977. – 12 с.