

Житомирський державний університет імені Івана Франка

(повне найменування вищого навчального закладу)

фізико-математичний факультет

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

кафедра фізики

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Магістерська робота

Магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: «Оптичні методи вимірювання температури»

Виконала: студентка 6 курсу, групи 62

напряму підготовки (спеціальності)

8.04020301 Фізика

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Демусь В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Степанчиков Д.А

(прізвище та ініціали)

Рецензент Рудніцький В.А

(прізвище та ініціали)

Житомир - 2014 рік

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1 .....	5
Поняття про температуру та прилади для її вимірювання .....	5
1.1 Фізична величина - температура .....	5
1.2 Температурні шкали .....	11
1.3 Прилади для вимірювання температури.....	13
РОЗДІЛ 2 .....	15
Експериментальне вимірювання високих температур.....	15
2.1 Безконтактні методи вимірювання температури .....	15
2.2 Характеристика досліджуваних джерел світла .....	20
2.3. Пірометричний спосіб вимірювання температури .....	27
2.4 Дослідження спектрів випромінювання джерел світла. ....	29
2.5 Вимірювання колірної температури джерел світла.....	36
ВИСНОВКИ.....	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ .....	41

## **ВСТУП**

**Актуальність дослідження.** В процесі розвитку різних галузей виробництва виникла потреба вимірювання високих температур за допомогою безконтактних засобів. Прилади для безконтактного вимірювання температури також застосовуються у котельних установках та інших енергогенеруючих об'єктах.

Контроль температури в технологічних процесах дозволяє підвищити якість продукції, передбачити аварійні ситуації, продовжити термін експлуатації обладнання. Вимірювання температури за допомогою пірометрів дозволяє контролювати технологічний процес.

Відтак, актуальність теми магістерської роботи зумовлена тим, що вона присвячена дослідженню оптичних методів вимірювання температур, що дозволяють визначати високі температури.

Теоретичною основою для створення безконтактних засобів вимірювання температури стало відкриття М. Планком, В. Віном, Л. Больцманом та іншими видатними вченими основних законів теплового радіаційного випромінювання, введення ними таких понять як „спектр” та „абсолютно чорне тіло” тощо, які лягли в основу принципу дії сучасних приладів з безконтактного вимірювання температури – пірометрів.

**Об'єкт дослідження:** джерела світла

**Предмет дослідження:** методи безконтактного визначення температур джерел світла.

**Метою дослідження** є аналіз характеристик випромінювання джерел світла для визначення температури.

**Завдання дослідження:**

- реєстрація спектрів випромінювання джерела світла;
- розробка методики вимірювання колірної температури;
- дослідження джерел світла, визначення яскравісних температур за допомогою пірометра.

**Методи:** аналіз літературних даних, експериментальне вимірювання спектра випромінювання джерел світла за допомогою спектрографа ДФС-8-1, математична обробка одержаних результатів програмами GetData Graph Digitizer, Origin Pro 7.0 та Microsoft Office Excel 7, вимірювання яскравісної температури пірометром із затухаючою ниткою ЛО-72.

**Публікації:** основні положення і результати даної роботи опубліковано в збірці наукових праць студентів та викладачів фізико-математичного факультету, їх викладено на студентській науково-практичній конференції «Науковий пошук молодих дослідників» (24 квітня 2014 року)

**Структура дипломної роботи.** Дипломна робота складається з вступу, двох розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та додатків. Повний обсяг дипломної роботи складає 43 сторінки, в тому числі 17 рисунків.

## РОЗДІЛ 1

### Поняття про температуру та прилади для її вимірювання

#### 1.1 Фізична величина - температура

З раннього дитинства людина дізнається про фізичну величину – температуру, як про сутність нагрітості тіл (холодне, тепле, гаряче); як характеристику теплої або холодної в різні пори року погоди; як показник стану здоров'я людини та ін. Побутове поняття температури часто перешкоджає розкриттю її глибокого фізичного змісту. Це одна із дуже не простих фізичних величин, до розуміння якої людство йшло протягом багатьох віків.

Поняття температури може бути введено на основі різних підходів: як величина, пропорційна середній кінетичній енергії частинок тіла, як розподіл частинок тіла за рівнями енергії або за швидкостями, за ступенями іонізації, за спектральною густиною випромінювання та ін. Такі температури часто і називають відповідно температурами збудження, кінематичною, іонізаційною, радіаційною. У вченні про теплоту температура вводиться через поняття теплової, або термічної, рівноваги, у більш загальному розумінні – через поняття термодинамічної рівноваги [13].

Поняття термодинамічної рівноваги встановлюється на основі дослідів. Якщо два тіла різного ступеня нагрітості привести в контакт, то виявляється, що одне тіло нагріватиметься, інше – охолоджуватиметься доти, доки в системі цих тіл не припиняться всякі макроскопічні зміни. За прийнятою термінологією це означає, що в системі цих тіл наступила термодинамічна рівновага і, отже, встановилася однакова температура [2]. Така рівновага самочинно встановлюється завжди незалежно від кількості контактуючих тіл або фізичних чи хімічних процесів, які можуть протікати в системі розглядуваних тіл протягом певного часу.

Самовільний процес переходу системи у стан термодинамічної рівноваги називається релаксацією, а час, протягом якого встановлюється рівновага, – часом релаксації. Зазначимо, що термодинамічна рівновага передбачає наявність

ізолюваної або замкненої системи, тобто системи тіл, які не можуть обмінюватись енергією з оточуючими тілами. Це ідеалізація, яка може наближатися до реальності лише у випадку, коли система міститься у теплонепровідній, або адіабатній, оболонці (наприклад, у посудині Дьюара).

Термодинамічну рівновагу в загальному випадку можна характеризувати як рівновагу динамічну в тому розумінні, що на мікроскопічному (молекулярному) рівні можуть відбуватися інтенсивні процеси, але всі макроскопічні процеси припиняються. Наприклад, якщо в посудину з водою насипати достатню кількість кухонної солі, то після встановлення рівноваги кількість рідкого розчину і солі у твердій фазі не змінюються, однак на молекулярному рівні постійно протікають процеси розчинення кристалізації, які макроскопічно повністю компенсуються.

Таким чином, для кожної статистичної системи (системи макроскопічних тіл) існує стан термодинамічної рівноваги, якої вона з часом самовільно сягає при фіксованих зовнішніх умовах. Ця встановлена експериментально закономірність часто формулюється як нульове начало термодинаміки. Під час термодинамічної рівноваги макроскопічні параметри системи (параметри, які вимірюються за допомогою макроскопічних приладів) не змінюються з часом і при цьому в системі немає будь-яких потоків.

Термодинамічна рівновага передбачає також механічну та хімічну рівновагу. Іншими словами, при рівновазі немає механічних переміщень, які загалом можуть виникати, наприклад, при неоднакових тисках у різних точках системи, а також не відбуваються хімічні процеси.

У випадку, якщо такі процеси виникають, то тіла системи можна відокремити теплопровідною тонкою перегородкою, через яку вільно передається енергія і з часом встановлюється теплова або термічна рівновага. В ізолюваній системі стан теплової рівноваги через деякий час встановлюється самочинно. У процесі встановлення рівноваги відбувається передача теплової енергії і, в результаті, вирівнювання температури тіл системи. Отже, у випадку

термодинамічної або термічної рівноваги температура в усіх точках ізольованої системи однакова і релаксаційних процесів немає.

Таким чином, з експериментальної точки зору, температура тіла — це величина, яка визначає, чи буде дане тіло передавати теплоту тілові з іншою температурою, чи, навпаки, отримуватиме від нього теплоту. На цій основі може бути встановлена об'єктивна міра нагрітості тіл — температура, яка є характеристикою внутрішнього стану тіла і визначає його тепловий, або енергетичний, стан.

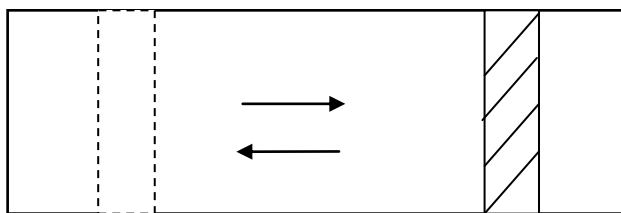
Кажучи про холодні або гарячі тіла, ми відзначаємо, що вони мають різну температуру. Тому, щоб відповісти на запитання, що таке температура, потрібно розібратися, чим відрізняється холодне тіло від гарячого. Це стало можливим лише на основі молекулярно-кінетичної теорії будови речовини.

З основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів  $p = \frac{2}{3} n_0 \frac{m_0 \langle v_{ke}^2 \rangle}{2}$  (1) випливає, що при  $V = \text{const}$  ( $n_0 = n/V$ , де  $n$  — число молекул у посудині об'ємом  $V$ ) тиск газу визначається середньою кінетичною енергією молекул. З дослідів відомо, що при  $V = \text{const}$  тиск газу можна змінити тільки нагріванням або охолодженням, тобто зміною його температури. Отже, між температурою та середньою кінетичною енергією молекул повинен існувати певний зв'язок [25].

Розглянемо докладніше зміст поняття температури. Візьмемо теплоізований циліндр з ідеальним газом, в якому встановилася теплова рівновага (температура в усіх точках об'єму газу однакова). Для наочності помістимо в циліндр без порушення рівноваги рухомий поршень, який розділить об'єм газу на дві частини (рис. 1.1) .



*Рис. 1.1 Теплоізований циліндр з ідеальним газом, в якому встановилася  
теплова рівновага*



*Рис. 1.2 Теплоізований циліндр з ідеальним газом, в нерівноважному стані*

У рівноважному стані поршень перебуватиме у спокої. Це означає, що в рівноважному стані не тільки температура, а й тиск з обох боків поршня однакові. Тоді згідно з рівністю (1) маємо

$$n_0 \left( \frac{m_{0 < v_{KB}^2 >}}{2} \right)_{\text{прав}} = n_0 \left( \frac{m_{0 < v_{KB}^2 >}}{2} \right)_{\text{лів}}. \quad (2)$$

Створимо в об'ємі газу градієнт температури (знявши, наприклад, теплоізоляцію ліворуч від поршня і нагрівши там газ). Після цього знову відновимо теплоізоляцію в лівому об'ємі. Тепер у циліндрі буде нерівноважний стан газу — температура  $T$  ліворуч від поршня вища, ніж у правій частині (рис. 1.2). Проте газ — ізована система. Тому почне здійснюватися процес релаксації. При цьому поршень внаслідок різниці тисків рухатиметься праворуч. А це означає, що виконується робота, і зліва направо через поршень передається тепла енергія, тобто в процесі теплової релаксації відбувається передача теплового руху молекул газу в лівій частині циліндра молекулам газу в правій частині циліндра. Через певний час поршень зупиниться у своєму початковому положенні, яке було до нагрівання лівої частини. Газ у циліндрі прийде в новий рівноважний стан, в якому температура і тиск вищі, ніж до нагрівання. Оскільки об'ємна концентрація молекул не змінилася, то в результаті нагрівання газу змінилася тільки середня кінетична енергія його молекул. Вирівнювання температури при цьому означає вирівнювання середньої кінетичної енергії молекул  $x$  відповідно вирівнювання тисків газу з обох боків поршня, що є причиною повернення його у вихідне положення.



Отже, середня кінетична енергія молекул "поводить" себе як температура, яка характеризує стан внутрішнього руху частинок рівноважної системи і має одне значення для всіх ділянок складної системи незалежно від кількості частинок в них. Тому температура є інтенсивним параметром (незалежним від маси системи).

У наведеному прикладі поршень був потрібний лише для наочності. Зрозуміло, що і без поршня молекули внаслідок зіткнень обмінюються енергіями, в результаті чого вона передаються від більшої нагрітої частини газу до менш нагрітої, що і приводить до вирівнювання середньої кінетичної енергії молекул в усьому об'ємі ідеального газу.

Отже, наведені прості, хоча и не дуже строгі міркування свідчать про те, що в рівноважних умовах температура однозначно пов'язана з середньою кінетичною енергією теплового руху молекул. Експериментальні дослідження і спостереження дають підстави поширити цей висновок на тіла в довільному агрегатному стані, температуру ідеального газу зручно прийняти рівною двом третинам середньої кінетичною енергією поступального руху молекули:

$$\frac{2}{3} \frac{m_0 \langle v_{KB}^2 \rangle}{2} = \theta.$$

Це значно спрощує запис основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів (1)

$$p = n_0 \theta. \quad (3)$$

Для вимірювання температури можна використати довільні одиниці енергії. Проте історично склалося так, що для вимірювання температури було запропоновано спеціальні одиниці градуси. Причина цього в тому, що вимірювати температуру навчилися раніше, ніж було з'ясовано її фізичний зміст. Крім того, використання одиниць енергії у термометрі становить значні метрологічні труднощі. Якщо вимірювати температуру в градусах, то потрібно ввести відповідний коефіцієнт, який переводить одиниці енергії в градуси. Цей коефіцієнт позначають літерою  $k$ . Тоді

$$\theta = kT. \quad (4)$$

Множник  $k$ , який виражає співвідношення між одиницями енергії і термодинамічної температури  $T$ , називають сталою Больцмана. Числове значення сталої Больцмана визначається дослідним шляхом. У СІ  $k = 1,380658(12)10^{-23}$  Дж/К. На основі формул (1), (3) , (4) дістанемо

$$\frac{m_0 \langle v_{KB}^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} kT. \quad (5)$$

З формули (5) можна розкрити зміст сталої Больцмана: вона показує, на скільки змінюється енергія теплового поступального руху однієї молекули при зміні температури на 1 К.

Температура – це макроскопічний параметр, який характеризує внутрішній тепловий стан тіла визначається рухом величезної кількості його структурних елементів (атомів, молекул тощо) .

У цьому розумінні температура є статистичною величиною, її молекулярно-кінетичне тлумачення таке: абсолютна температура тіла в рівноважних умовах – це міра середньої кінетичної енергії хаотичного поступального руху його молекул. З формули (5) випливає, що при однаковій температурі молекули різних газів мають однакову середню енергію поступального руху.

Статистично поняття температури має сенс лише для колективу молекул. Не можна говорити про температуру однієї або кількох (небагатьох) молекул, про "гарячі" або "холодні" молекули. Поняття температури втрачає сенс, наприклад, щодо газу в космічному просторі, де концентрація молекул настільки незначна, що вони не утворюють газу в звичайному розумінні цього слова.

Поняття температури є означенням лише для рівноважних станів системи. Тому для систем, які близькі до рівноважних станів, температура є наближеною характеристикою. Для систем, які явно перебувають у нерівноважному стані, поняття температури взагалі втрачає сенс [2].

## 1.2 Температурні шкали

Хоча поняття температури інтуїтивно зрозуміле, як стан тепла й холоду, її вимірювання, тобто співставлення з певною одиницею температури й кількісне вираження у вигляді числа, є методологічно складною проблемою. Температуру неможливо виміряти безпосередньо. Проте, при нагріванні або охолодженні тіла змінюються його фізичні властивості: довжина і об'єм, густина, пружні властивості, електропровідність тощо.

Основою для вимірювання температури може бути зміна будь-якої властивості будь-якого тіла, якщо для нього відома залежність даної властивості від температури. Вибране для вимірювання температури тіло називають термометричним, а прилад для вимірювання температури – термометром [3].

Для однозначного визначення температури різними методами й на основі зміни різних властивостей термометричних тіл, термометри необхідно градувати. Для цього використовуються температурні шкали. В основі температурних шкал — особливі реперні точки, яким присвоюється певне значення температури. Історично склалися різні температурні шкали, що використовують різні реперні точки, які пов'язані з певними фізичними явищами, що відбуваються при певній температурі.

В Міжнародній системі одиниць (СІ) термодинамічна температура належить до семи основних одиниць і виражається у кельвінах [7]. До похідних величин СІ, які мають спеціальну назву, належить температура Цельсія, яка вимірюється у градусах Цельсія. На практиці часто застосовують градуси Цельсія через історичну прив'язку до важливих характеристик води - температури танення льоду ( $0^{\circ}\text{C}$ ) і температури кипіння ( $100^{\circ}\text{C}$ ). Це зручно, оскільки більшість кліматичних процесів, процесів у живій природі, тощо пов'язані з цим діапазоном. Зміна температури на один градус Цельсія тотожна зміні температури на один Кельвін. Тому після введення в 1967 році нового визначення Кельвіна, температура кипіння води перестала грати роль незмінної реперної точки і, як

показують точні вимірювання, вона вже не дорівнює  $100^{\circ}\text{C}$ , а близька до  $99,975^{\circ}\text{C}$ .

У Міжнародній системі одиниць (СІ) для вимірювання температури застосовується шкала Кельвіна і символ К (при цьому знак градуса  $^{\circ}$  відсутній). Широкий вжиток також мають системи Цельсія і Фаренгейта [14].

1. Шкала Фаренгейта була винайдена Фаренгейтом, німецьким ученим. В один з холодних зимових днів 1709 ртуть у термометрі вченого опустилася до дуже низької температури, яку він запропонував прийняти за нуль за новою шкалою. Інший реперною точкою стала температура людського тіла. Температурою замерзання води по його шкалі стали  $+32^{\circ}$ , а температурою кипіння  $+212^{\circ}$ . Шкала Фаренгейта не є особливо продуманої і зручною. Раніше вона широко застосовувалася в англомовних країнах, в даний час – практично тільки в США.

2. За шкалою Цельсія (запропонована шведом Андерсом Цельсієм в 1742 році) за нуль прийнята температура суміші льоду й води (температура, при якій тане лід), інша основна точка – температура, при якій вода закипає. Інтервал між ними вирішено було поділити на 100 частин, і одна частина прийнята за одиницю виміру – градус Цельсія. Ця шкала більш раціональна, ніж шкала Фаренгейта і шкала Реомюра, і зараз використовується повсюдно.

3. За шкалою Реомюра, винайденої французьким вченим Рене де Реомюром в 1731 році, нижньої реперною точкою служить точка замерзання води. Шкала заснована на використанні спирту, який розширюється при нагріванні, за градус була прийнята тисячна частина обсягу спирту в резервуарі і трубці при нулі. Зараз ця шкала вийшла з ужитку.

4. Шкала Кельвіна винайдена в 1848 році лордом Кельвіном (англійський учений У. Томсон). На ній нульова точка відповідала найнижчому можливій температурі, при якій припиняється рух молекул речовини. Це значення було теоретично обчислено при вивченні властивостей газів. За шкалою Цельсія це значення відповідає приблизно –  $273^{\circ}\text{C}$ , т. е. нуль за Цельсієм дорівнює 273 К.

Одиницею виміру нової шкали став один кельвін (спочатку іменувався «градус Кельвіна»).

5. Шкала Ранкина (за прізвищем шотландського фізика У. Ранкина) має той же принцип, що у шкали Кельвіна, а розмірність ту ж, що шкала Фаренгейта. Ця система практично не набула поширення.

Значення температур, які дає нам шкала Фаренгейта і Цельсія, можуть бути легко переведені один в одного. При перекладі «в умі» (тобто швидко, не користуючись спеціальними таблицями) значень за Фаренгейтом в градуси Цельсія потрібно вихідну цифру зменшити на 32 одиниці і помножити на  $5/9$ . Навпаки (з шкали Цельсія в Фаренгейта) – помножити вихідне значення на  $9/5$  і додати 32. Для порівняння: температура абсолютного нуля за Цельсієм –  $273,15^{\circ}$ , за Фаренгейтом –  $459,67^{\circ}$ .

### 1.3 Прилади для вимірювання температури

Температуру вимірюють за допомогою пристроїв, що використовують різні термометричні властивості рідин, газів і твердих тіл. Існують десятки різних пристроїв, які використовують в промисловості, при наукових дослідженнях, для спеціальних цілей.

В таблиці 1.1 наведено найпоширеніші види приладів для вимірювання температури і практичні межі їх використання.

Таблиця 1.1

**Прилади для вимірювання температури**

Тип засобу виміру	Різнovid засобу виміру	Межа тривалого застосування, $^{\circ}\text{C}$	
		нижня	верхня
Термометри розширення	Рідинні скляні термометри	-200	600
	Манометричні термометри	-200 (-272)	1000

Термометри опору	Металічні (провідникові) термометри опору	-260	1100
	Напівпровідникові термометри опору	-272	600
Термоелектричні термометри	Термоелектричні термометри	-200 (-270)	2200 (2800)
Пірометри	Квазімонохроматичні пірометри	700	6000 (100 000)
	Пірометри спектрального відношення	300	2800
	Пірометри повного випромінювання	-50	3500

Прилади для вимірювання температури розділяються залежно від використовуваних ними фізичних властивостей речовин на наступні групи з діапазоном показань:

Термометри розширення  $(-200...+600^{\circ}\text{C})$  засновані на властивості тіл змінювати під дією температури свій об'єм.

Манометричні термометри  $(-200...+1000^{\circ}\text{C})$  працюють за принципом зміни тиску рідини, газу або пари з рідиною в замкнутому об'ємі при нагріванні або охолодженні цих речовин.

Термометри опору  $(-260...+1100^{\circ}\text{C})$  засновані на властивості металевих провідників змінювати залежно від нагрівання їхній електричний опір.

Термоелектричні термометри  $(-200...+2200^{\circ}\text{C})$  побудовані на властивості різнорідних металів і сплавів утворювати в парі (спаї) термоелектрорушійну силу, що залежить від температури спаю.

Пірометри  $(-50...+6000^{\circ}\text{C})$  працюють за принципом вимірювання випромінюваної нагрітими тілами енергії, що залежить від температури цих тіл.

## **РОЗДІЛ 2**

### **Експериментальне вимірювання високих температур**

#### **2.1 Безконтактні методи вимірювання температури**

У фізиці високі температури зручно вимірювати за допомогою безконтактних засобів. Зокрема, пірометр дає змогу експериментально визначати такі температури.

Дія пірометрів заснована на залежності теплового випромінювання нагрітих тіл від їхньої температури і фізико-хімічних властивостей. На відміну від термометрів первинний перетворювач пірометра не підпадає під вплив високої температури і не змінює температурне поле, тому що перебуває поза вимірювальним середовищем [5].

З підвищенням температури нагрітого тіла інтенсивність його теплового випромінювання у вигляді електромагнітних хвиль різної довжини швидко зростає. При нагріванні до  $500^{\circ}\text{C}$  тіло випромінює невидимі інфрачервоні промені великої довжини хвилі, однак подальше збільшення температури викликає появу видимих променів меншої довжини, завдяки яким тіло починає світитися. Спочатку розпечене тіло має темно-червоні кольори, що у міру росту температури і появи променів, що поступово зменшуються за довжиною хвилі, переходить у червоний, жовтогарячий, жовтий і, нарешті, білі кольори, що складається з комплексу променів різної довжини хвилі.

Одночасно зі збільшенням температури нагрітого тіла і зміною його кольору сильно зростає інтенсивність часткового (монохроматичного або одноколірного) випромінювання (яскравість) для даної ефективної довжини хвилі, а також помітно збільшується інтенсивність сумарного випромінювання (радіація) тілом енергії, що дозволяє використовувати ці властивості для вимірювання температури нагрітих тіл. Різні фізичні тіла, що нагріті до однієї і тієї ж температури, мають неоднакові часткову і сумарну інтенсивності випромінювання і мають різні коефіцієнти поглинання, що представляють собою відношення енергії, поглиненої тілом, до енергії, що падає на тіло.

Найбільшу здатність випромінювання і поглинання енергії має так назване абсолютно чорне тіло, у природі не існуюче, що представляє собою уявлюваний ідеальний випромінювач. Це тіло поглинає всі падаючі на нього промені, тобто має коефіцієнт поглинання, що дорівнює одиниці, і має найбільшу інтенсивність випромінювання. Фізичні тіла мають здатність відбивати частину падаючих на них променів і, отже, завжди мають коефіцієнт поглинання менше одиниці. Інтенсивність випромінювання і коефіцієнт поглинання при даній температурі залежать від складу речовини і стану його поверхні. Тіло, що має темну і шорсткувату поверхню, ближче по своїх властивостях до чорного тіла, чим тіло зі світлою і полірованою поверхнею.

У цьому зв'язку шкалу пірометра доводиться градувати по випромінюванню чорного тіла. Тому що випромінювальна здатність реальних тіл менше, ніж чорних тіл, то показання пірометра будуть відповідати не дійсній температурі реального тіла, а дають умовну температуру або, у цьому випадку, так названу температуру яскравості. Пірометри, що вимірюють температуру яскравості по спектральній яскравості у видимій частині спектра, називають оптичними (квазімонохроматичні) візуальними пірометрами і фотоелектричними [8].

Прилади, що вимірюють температуру за значенням відносини енергетичних яскравостей у двох спектральних інтервалах, називають колірними пірометрами або пірометрами спектрального відношення [16].

Оптичні пірометри широко застосовуються в лабораторних і виробничих умовах для вимірювання температур вище  $800^{\circ}\text{C}$ . Принцип дії оптичних пірометрів заснований на порівнянні спектральної яскравості тіла зі спектральною яскравістю градуйованого джерела випромінювання. Як чутливий елемент, що визначає збіг спектральних яскравостей у візуальних оптичних пірометрах, служать очі людини. Найпоширенішим є оптичний пірометр зі зникаючою ниткою, схема якого наведена на рис. 2.1. Для вимірювання температури об'єктів



приладу направляється на об'єкт вимірювання ОВ так, щоб спостерігач на його тлі побачив в окулярі 7 нитку оптичної лампи 4.

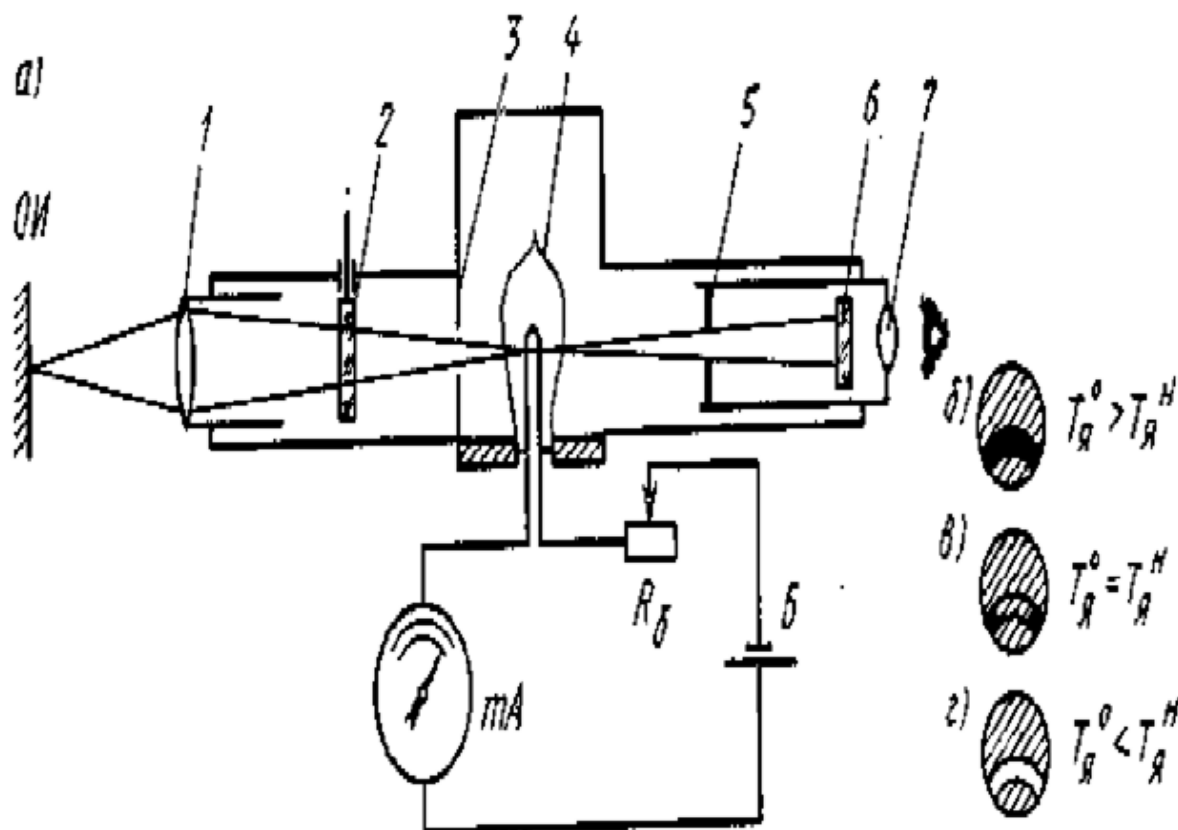


Рис. 2.1. Оптичний пірометр зі зникаючою ниткою

Порівняння спектральних яскравостей об'єкта вимірювання і нитки лампи 4 здійснюються звичайно при довжині хвилі рівної 0,65 мкм, для чого перед окуляром установлений червоний світлофільтр 6. Вибір червоного світлофільтра обумовлений тим, що око людини сприймає через цей фільтр тільки частину спектра його пропущення, що наближається до монохроматичного променя. Крім того, застосування червоного світлофільтра дозволяє знизити нижню межу вимірювання пірометра.

Спостерігаючи за зображенням нитки лампи на тлі об'єкта вимірювання (світлий фон — темна нитка (рис.3 б); темний фон — світла нитка (рис.3, г)) за допомогою реостата змінюють силу струму, що йде від батареї Б до нитки лампи, доти, поки яскравість нитки не стане рівною видимій яскравості об'єкта вимірювання. При досягненні зазначеної рівності нитка «зникає» на фоні

зображення об'єкта вимірювання (рис.3, в). У цей момент по шкалі міліамперметра, попередньо градуированого в значеннях температури яскравості нитки лампи, визначають яскравісну температуру об'єкта. По вимірюваній яскравісній температурі і відповідних значень розраховують істинну температуру об'єкта.

Звичайно в оптичних пірометрах є дві шкали, однією з яких користуються при не встановленому поглинаючому світлофільтрі, наприклад від 800 до 1200°C, а другий — при встановленому світлофільтрі від 1200 до 2000°C. Існуючі в цей час оптичні пірометри призначені для вимірювання температур в інтервалі від 800 до 6000°C и мають різні модифікації з різними межами вимірювання. Клас точності оптичних пірометрів 1,5-4,0.

На точність вимірювання температури оптичними пірометрами впливають ступінь відхилення властивостей випромінювача від властивостей чорного тіла, а також поглинання променів проміжним середовищем, через яку проводиться спостереження. На результатах вимірювання впливають наявність у навколишньому повітрі пилу, диму і великого змісту двоокису вуглецю. Крім того, усяке забруднення оптичної системи пірометрів також веде до збільшення похибки вимірювання.

Перевагами оптичних пірометрів є порівняно висока точність вимірювання, компактність приладу і простота роботи з ними. До числа їхніх недоліків варто віднести потребу в джерелі живлення, неможливість стаціонарного вимірювання температури і автоматичного її запису, а також суб'єктивність методу вимірювання, заснованого на спектральній чутливості очей спостерігача [9].

Багато реальних тіл, такі, як кераміка, оксиди металів, вогнестійкі вироби, графіт і ін., є практично сірими. У цьому зв'язку переваги колірного методу вимірювання очевидні, тому що колірна температура багатьох твердих і рідких тіл значно менше відрізняється від істинної температури, чим яскравісна або радіаційна.

Фотоелектричні пірометри. На відміну від оптичних візуальних пірометрів фотоелектричні пірометри є автоматичними. Чутливими елементами, що сприймають променисту енергію, у цих приладах можуть служити фотоелементи, фотомножники, фотоелементи опору і фотодіоди. Вимір температури фотоелектричними пірометрами, як і оптичними візуальними, засновано на залежності спектральної яскравості тіла від його температури.

Фотоелектричні пірометри за принципом дії бувають двох типів. До першого типу відносяться прилади, у яких сприймана приладом промениста енергія, потрапляючи на чутливий елемент, змінює його параметри (фотострум, опір). У приладах другого типу вимір променистої енергії здійснюється компенсаційним методом, тут чутливий елемент працює в режимі нуля-індикатора, порівнюючи інтенсивності випромінювання від вимірюваного тіла і стабільного джерела випромінювання - мініатюрної лампочки накаливання.

Пірометри сумарного випромінювання. Вимірювання температури пірометрами сумарного випромінювання засновано на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл. Теплові промені, які уловлюються пірометром, концентруються за допомогою збірної лінзи на термочутливому елементі, що складається з невеликої термобатарей. Променистий потік направляється лінзою на робочі кінці термобатарей, по ступені нагрівання яких судять про температуру випромінювача. Вторинним приладом пірометра служить мілівольтметр або автоматичний потенціометр. Пірометр сумарного випромінювання характеризується рядом переваг у порівнянні з візуальним, що полягають в об'єктивності методу вимірювання, відсутності стороннього джерела живлення і можливості застосування дистанційної передачі показань на вторинні прилади, але уступає йому, як було зазначено раніше, у точності вимірювання.

Для вимірювання температур вище  $3000^{\circ}\text{C}$  методи пірометрії є практично єдиними, тому що вони безконтактні. Теоретично верхня межа вимірювання температури пірометрами випромінювання необмежена [15].

## 2.2 Характеристика досліджуваних джерел світла

У наступних пунктах 2.3, 2.4 та 2.5 ми досліджуватимемо галагенову лампу, світлодіод, лампу розжарення та люмінесцентну лампу. Тому для початку розглянемо характеристики даних джерел світла.

Галогенна лампа — лампа розжарення, в балон якої додано буферний газ: пару галогенів (броду або йоду). Це підвищує тривалість життя лампи до 2000-4000 годин, і дозволяє підвищити температуру спіралі [4]. При цьому робоча температура спіралі становить приблизно 3000 К.

Принцип дії галогенової лампи (рис. 2.2) полягає в тому, що електричний струм, проходячи через тіло розжарення (зазвичай — вольфрамову спіраль), нагріває його до високої температури. Нагріваючись, тіло розжарення починає світитися. Однак через високу робочу температуру атоми вольфраму випаровуються з поверхні тіла розжарення (вольфрамової спіралі) і осідають (конденсуються) на холодніших за спіраль поверхнях колби, обмежуючи цим термін служби лампи. У галогенній лампі йод, що оточує тіло розжарення (разом із залишковим киснем), вступає в хімічну взаємодію з випаровуваними атомами вольфраму, перешкоджаючи осіданню останніх на колбі. Цей процес є зворотнім — при високих температурах біля тіла розжарення утворені хімічні сполуки розпадаються на складові речовини. Таким чином атоми вольфраму вивільняються або на самій спіралі, або поблизу неї. В результаті цього атоми вольфраму повертаються на тіло розжарення, що дозволяє підвищити робочу температуру спіралі (для отримання яскравішого світла), продовжити термін служби лампи, а також зменшити габарити у порівнянні зі звичайними лампами розжарення тієї ж потужності. Галогенні лампи однаково добре працюють на змінному та постійному струмі. При застосуванні плавного ввімкнення термін служби може бути підвищений до 8000-12 000 годин.



*Рис. 2.2. Галогенова лампа*

Галогенні лампи забезпечують дуже добре відтворення кольорів (Ra 99-100), оскільки їх безперервний спектр близький до спектру абсолютно чорного тіла з температурою 2800-3000 К, тобто такі лампи мають колірну температуру 2800-3000 К. Світло цих ламп підкреслює теплі тони, хоча і меншою мірою, ніж світло звичайних ламп розжарення.

Люмінесцентна лампа — газорозрядне джерело світла (рис.2.3), світловий потік якого визначається в основному світінням люмінофорів під впливом ультрафіолетового випромінювання розряду: широко застосовується для загального освітлення, оскільки світлова віддача і термін служби в кілька разів більший, ніж у ламп з ниткою розжарювання того ж призначення [4].



*Рис. 2.3. Люмінесцентна лампа*

При роботі люмінесцентної лампи між двома електродами, що розташовані на протилежних кінцях лампи виникає електричний розряд. У лампі, яка заповнена парами ртуті, змінний струм приводить до появи УФ-випромінювання. Це випромінювання невидиме для людського ока, тому його перетворюють у видиме світло за допомогою явища люмінесценції. Внутрішні стінки лампи покриті спеціальною речовиною — люмінофором, що поглинає УФ-випромінювання і виділяє видиме світло. Змінюючи склад люмінофора, можна змінювати відтінок одержаного світла.

Багато людей вважають світлове випромінювання люмінесцентних ламп грубим і неприємним. Колір предметів освітлених такими лампами може бути трохи незвичним. Частково це відбувається через сині і зелені лінії в спектрі випромінювання газового розряду в парах ртуті, частково через тип застосовуваного люмінофора.

У багатьох дешевих лампах застосовується галофосфатний люмінофор, що випромінює в здебільшого жовте і синє світло, у той час як червоного і зеленого

випромінюється набагато менше. Така суміш кольорів оку здається білим, однак при відображенні від предметів світло може містити неповний спектр, що сприймається як перекручування кольору. Однак такі лампи як правило мають дуже високу світлову віддачу.

У дорожчих лампах використовується «трилінійний» і «п'ятилінійний» люмінофор. Це дозволяє домогтися рівномірнішого розподілу випромінювання у видимому спектрі, що приводить до натуральнішого відтворення світла. Однак такі лампи, як правило, мають нижчу світлову віддачу.

Також існують люмінесцентні лампи, призначені для освітлення приміщень, у яких утримують птахів. Спектр цих ламп містить ближній ультрафіолет, що дозволяє створити для них комфортніше освітлення, наблизивши його до природного, тому що птахи, на відміну від людей, мають чотирикомпонентний зір.

Лампа розжарення — освітлювальний прилад (рис. 2.4), в якому світло випромінюється тугоплавким провідником, нагрітим електричним струмом до розжарення [6]. У лампі розжарення використовується ефект нагрівання провідника (нитки розжарення) при протіканні через нього електричного струму. Температура вольфрамової нитки розжарення різко зростає після увімкнення струму. Нитка випромінює електромагнітне випромінювання відповідно до закону Планка. Функція Планка має найвище значення, положення якого на шкалі довжин хвиль залежить від температури. Це найвище значення змінюється з підвищенням температури у бік менших довжин хвиль (закон зміщення Віна). Для отримання видимого випромінювання необхідно, щоб температура була порядку декількох тисяч градусів, в ідеалі 6000 К (температура поверхні Сонця). Чим менша температура, тим менша частка видимого світла і тим більше «червоним» здається випромінювання. Частину спожитої електричної енергії лампа розжарення перетворює у випромінювання, частину - на виділення тепла. Лише мала частка випромінювання лежить в області видимого світла, основна частка припадає на інфрачервоне випромінювання.





*Рис.2.4. Лампа розжарення*

Для підвищення ККД лампи та отримання «найбілішого» світла необхідно підвищувати температуру нитки розжарювання, яка у свою чергу обмежена властивостями матеріалу нитки — температурою плавлення. Ідеальна температура 6000 К недосяжна, оскільки при такій температурі будь-який матеріал плавиться, руйнується і перестає проводити електричний струм. У сучасних лампах розжарювання застосовують матеріали з найвищими температурами плавлення — вольфрам ( $3410^{\circ}\text{C}$ ) і, дуже рідко, осмій ( $3045^{\circ}\text{C}$ ).

При практично досяжних температурах  $2300\text{—}2900^{\circ}\text{C}$  випромінюється далеко не біле і не денне світло. Лампи розжарювання випускають світло, яке здається більш «жовто-червоним», ніж денне світло. Для характеристики якості світла використовується т.з. кольорова температура. У звичайному повітрі при таких температурах вольфрам миттєво перетворився б на оксид. З цієї причини вольфрамова нитка захищена скляною колбою, заповненою нейтральним газом (зазвичай аргоном). Перші лампочки робилися з вакуумованими колбами. Проте у вакуумі при високих температурах вольфрам швидко випаровується, роблячи нитку тоншою і затемнюючи скляну колбу осадом. Пізніше колбу стали заповнювати хімічно нейтральними газами. Вакуумні колби зараз використовують лише для ламп малої потужності.



Частка електричної енергії, яка перетворюється на світло, тим більша, чим більша температура розжарення спіралі у лампі. Є дві причини, які заважають підвищувати температуру:

- випаровування вольфраму, унаслідок якого чорніє скляний балон і потоншується нитка розжарення;
  - повзучість нитки під дією сили ваги, магнітних та електростатичних сил.
- Щоб зменшити випаровування вольфраму до балону додають композиційний газ (наприклад аргон з домішкою галогену йоду). Пара йоду реагує з парою вольфраму та конденсатом вольфраму. Сполука потрапляє на розжарену спіраль, розкладається. Вольфрам осідає на дріт, відновлюючи його діаметр до початкової величини і знову починається дія йоду.

Щоб зменшити повзучість нитки, до вольфраму вводять частинки двоокису торію. Вони блокують рух дислокацій за площинами ковзання, а також ускладнюють поширення мікротріщин. Тому спіраль стає менш крихкою. Довговічність лампи зростає в 2-3 рази, тепловіддача - на 20-30%.

Світлодіод (англ. LED - light-emitting diode) — напівпровідниковий пристрій (рис. 2.5), що випромінює некогерентне світло, при пропусканні через нього електричного струму (ефект, відомий як електролюмінесценція) [31].

Випромінюване світло традиційних світлодіодів лежить у вузькій ділянці спектру, а його колір залежить від хімічного складу використаного у світлодіоді напівпровідника. Сучасні світлодіоди можуть випромінювати світло від інфрачервоної ділянки спектру до близької до ультрафіолету. Існують методи розширення смуги випромінювання і створення білих світлодіодів. На відміну від ламп розжарювання, які випромінюють світловий потік широкого спектру, рівномірно у всіх напрямках, звичайні світлодіоди випромінюють світло певної довжини хвилі і в певному напрямі. Світлодіоди були удосконалені до лазерних діодів, — які працюють на тому ж принципі, але можуть напрямлено випромінювати когерентне світло [4].



*Рис.2.5. Світлодіод*

Ефективність світлодіодів найбільше проявляється там, де потрібно генерувати потужні кольорові світлові потоки (світлові сигнали). Світло від лампи розжарювання доводиться пропускати через спеціальні оптичні фільтри, що виділяють певну частину спектру (червону, синю, зелену). 90% енергії світлового потоку, від лампи розжарювання, втрачається, при проходженні світла через світлофільтр. Усі ж 100% випромінювання світлодіода є забарвленим світлом і в застосуванні світлофільтра немає потреби. Більше того, близько 80-90% споживаної потужності лампи розжарювання, витрачається на її нагрів, — для досягнення потрібної колірної температури (шкала Кельвіна), на яку вони спроектовані.

Світлодіодні лампи споживають від 3% до 60% потужності, необхідної для звичайних ламп розжарювання, аналогічної яскравості. Удароміцна конструкція твердотілих випромінювачів (світлодіодів), дозволяє використовувати світлодіодні лампи при підвищених вібраціях. Світлодіоди не бояться частих

вмикань і вимикань. Термін служби світлодіодної лампи — більше 100 000 годин (більше 11 років).

Використовуючи світлодіоди можна одержати світло з високою насиченістю кольору. Світлодіоди застосовують у індикаційній техніці, при побудові світлодіодних джерел світла (інформаційні табло, світлофори, ліхтарики, гірлянди тощо)[6].

### **2.3. Пірометричний спосіб вимірювання температури**

Визначимо колірну температуру використавши установку, схему якої зображено на рис. 2.1.

Для початку під'єднаємо галогенову лампу до електричної мережі, встановивши напругу 4,0 В. Ставимо оптичний пірометр на віддалі 0,8-1,0 м від лампи, наводимо зорову трубу пірометра на розжарену спіраль, перед цим відкривши об'єktiv. При цьому реостат пірометра має знаходитися в лівому положенні. Вмикаємо живлення нитки пірометра. Поступово збільшуючи реостатом струм через нитку пірометра, поки її розжарення не буде видно в окуляр. Пересуваючи окуляр до себе (або від себе) досягаємо різкості зображення нитки пірометра, а пересуваючи об'єktiv пірометра від себе (чи до себе), досягаємо різкості зображення досліджуваної спіралі. Суміщаємо спіраль з ниткою пірометра. При однаковій яскравості нитки і спіралі знімаємо значення сили струму [20]. Даний експеримент проробляємо кілька разів і по середньому значенню сили струму живлення нитки пірометра визначаємо температуру в °С, по таблиці. Переводимо її в К і одержуємо яскравісну температуру. Користуючись співвідношенням (6) отримаємо дійсну температуру лампи.

$$I = 0,31505619047 + 0,01567214285 \cdot S + 0,00049273809 \cdot S^2 + 0,00001250000 \cdot S^3,$$

$$S = \frac{t-1400}{100}, \quad t = S \cdot 1000 + 1400. \quad (6)$$

Для галогенової лампи дослід проводимо тричі при цьому змінюємо напругу  $U_1 = 4 \text{ В}$ ,  $U_2 = 5,5 \text{ В}$ ,  $U_3 = 8 \text{ В}$ . Зі збільшенням напруги збільшується температура лампи, відповідні результати дослідження наведені у таблиці 2.1

Аналогічно визначаємо температуру для люмінесцентної лампи білого світла таб. 2.2, лампи розжарення таб. 2.3 та світлодіода таб. 2.4

Таблиця 2.1

**Результати вимірювань для галогенової лампи**

U	I	$\langle I \rangle$	$T_{яск}$	$T_{іст}$
(В)	(А)	(А)	К	К
4	0, 322	0,323	1725	1890
	0,324			
	0,324			
5,5	0, 352	0,347	1867	2010
	0,344			
	0,346			
8	0, 391	0,387	2071	2240
	0,384			
	0,386			

Таблиця 2.2

**Результати вимірювань для люмінесцентної лампи білого світла**

I	$\langle I \rangle$	$T_{яск}$	$T_{іст}$
(А)	(А)	К	К
0, 352	0,352	1400	1480
0,352			
0,352			

**Результати вимірювань для лампи розжарення**

I	$\langle I \rangle$	$T_{яск}$	$T_{іст}$
(A)	(A)	К	К
0,452	0,44	2318	2520
0,428			
0,44			

Таблиця 2.4

**Результати вимірювань світлодіода**

I	$\langle I \rangle$	$T_{яск}$	$T_{іст}$
(A)	(A)	К	К
0,4112	0,407	2173	2360
0,404			
0,408			

Провівши даний експеримент з різними джерелами світла, ми можемо сказати, що найвищу температуру має лампа розжарення – 2520 К, а найменшу люмінесцентна лампа білого світла – 1480 К.

В основі даного методу лежить припущення, що спектр випромінювання джерел подібний до спектру випромінювання абсолютно чорного тіла, тому для перевірки необхідно дослідити спектр випромінювання досліджуваних джерел світла.

**2.4 Дослідження спектрів випромінювання джерел світла.**

Для реєстрації спектрів досліджуваних джерел світла, використаємо установку, схему якої наведено на рис.2.5.

Світло від джерела (1) за допомогою лінзи (2) спрямовувалося на вхідну щілину спектрографа ДФС-8- 1 (3). В спектрографі за допомогою відбиваючої дифракційної решітки одержувався спектр досліджуваного об'єкта. Вихідна щілина спектрографа вирізала невелику ділянку спектра, світло від якого

реєструвалося ФЕП-79 (4), який був з'єднаний з компаратором напруг Р3003 (5). Сигнал реєструвався самописцем (6) сполученим з компаратором.

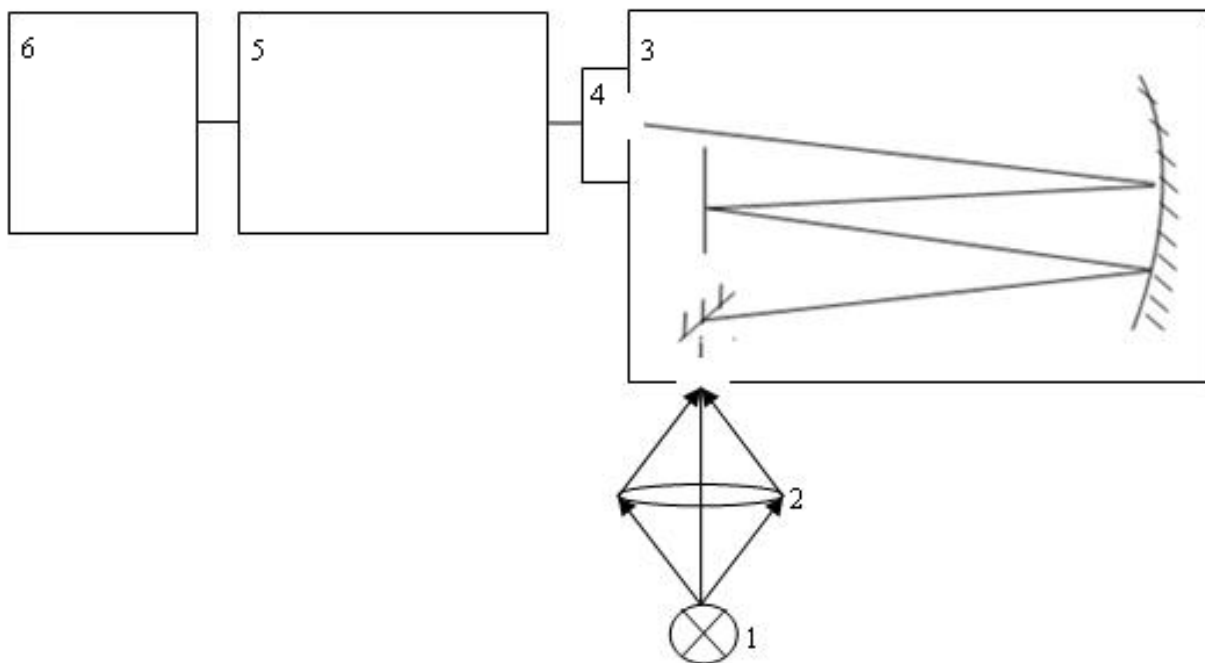


Рис. 2.5. Схема установки реєстрації спектрів випромінювання досліджуваного джерела світла.

Одержані спектри оцифровувалися та вводилися в комп'ютер для подальшої обробки програмою Origin Pro 7.0

В результаті був отриманий спектр випромінювання досліджуваної лампи розжарення показаний на рис.2.6 Варто врахувати, що чутливість ФЕП сильно залежить від довжини хвилі. В даному випадку крива чутливості ФЕП, що використовувалася в установці відповідає кривій (3). Тоді реальна інтенсивність випромінювання лампи зображена на рис.9 крива (4) може бути отримана за формулою  $I(\lambda) = \frac{I_0(\lambda)}{k(\lambda)}$ , де  $k$  – коефіцієнт чутливості ФЕП.

Спектр випромінювання чорного (сірого) тіла може бути описаний формулою Планка  $I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$ , (7)

де  $\nu$  - частота випромінювання,  $h$  - постійна Планка,  $c$  - швидкість світла,  $k$  – стала Больцмана.

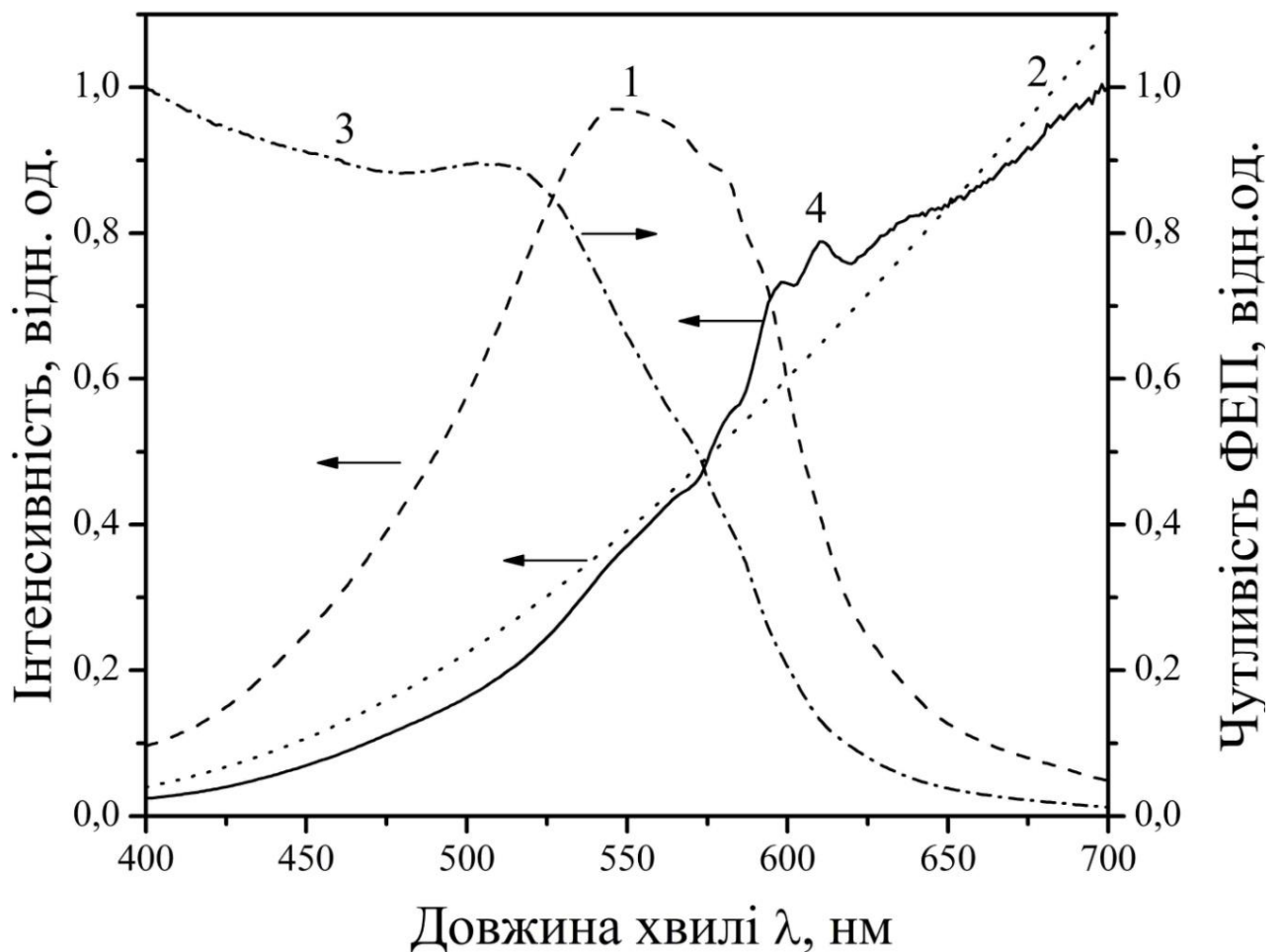


Рис. 2.6. Спектр випромінювання лампи розжарення (1- крива, отримана в результаті експерименту, 2-графік теплового випромінювання, 3-крива чутливості, 4-реальний спектр випромінювання лампи розжарення)

Випромінювальна здатність сірого тіла пропорційна чорному, тобто спектри подібні.

Якщо нитку лампи розжарення розглядати, як сіре тіло, то найкраще узгодження результатів експерименту та розрахунків згідно формули досягається при температурі 2530 К. Деякі розходження пірометричним методом очевидно пов'язані з деякими відмінностями лампи розжарення від спектру сірого тіла.

Аналогічним методом були визначені спектри випромінювання галогенової лампи. При чому для галогенової лампи даний дослід був проведений при різних напругах, а відтак змінювався і струм. Результати досліджень зображені на

рис.2.7, де 2 – спектр отриманий в результаті проведеного експерименту, 1 – спектр випромінювання галогенової лампи, з урахуванням кривої чутливості 3.

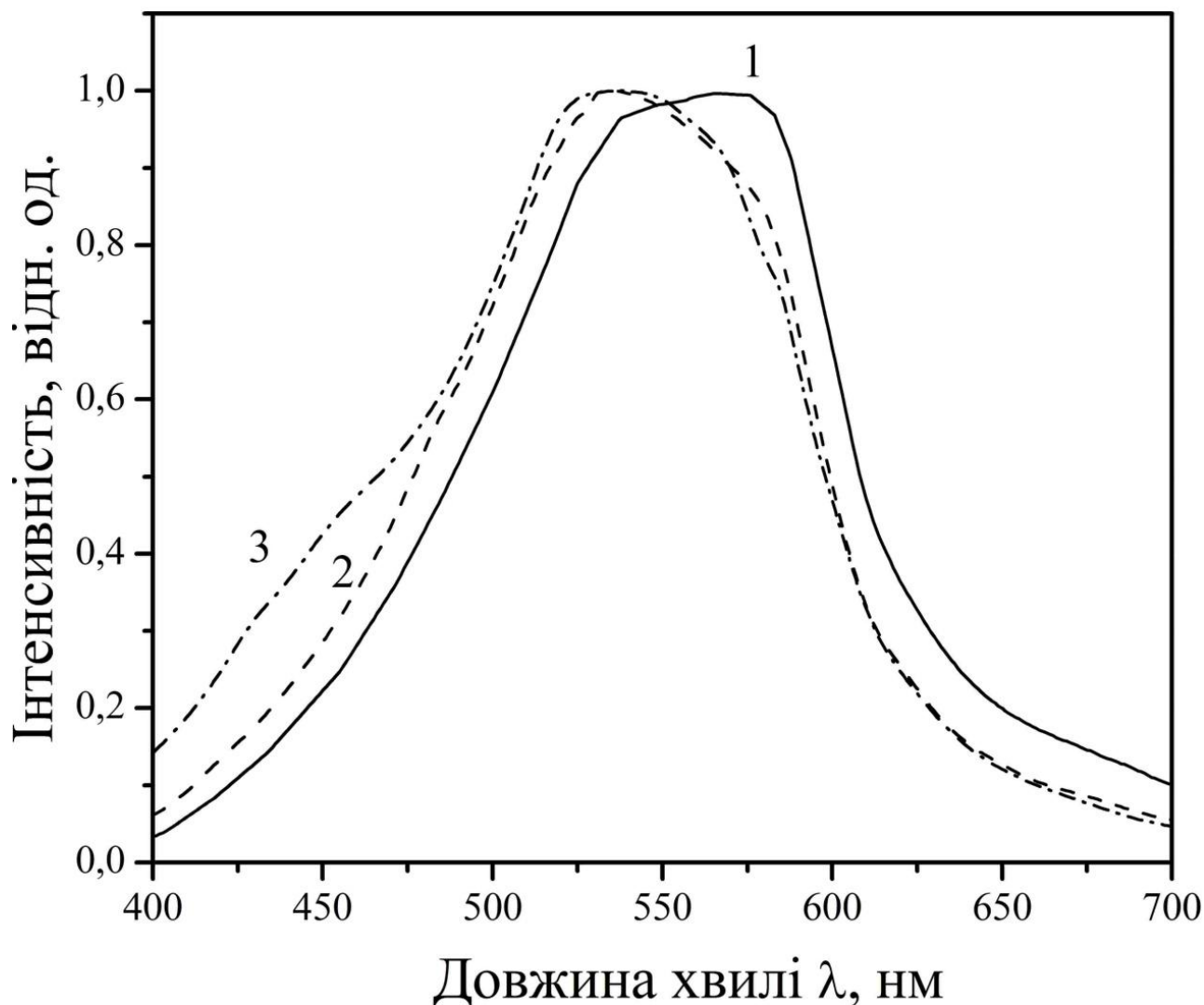
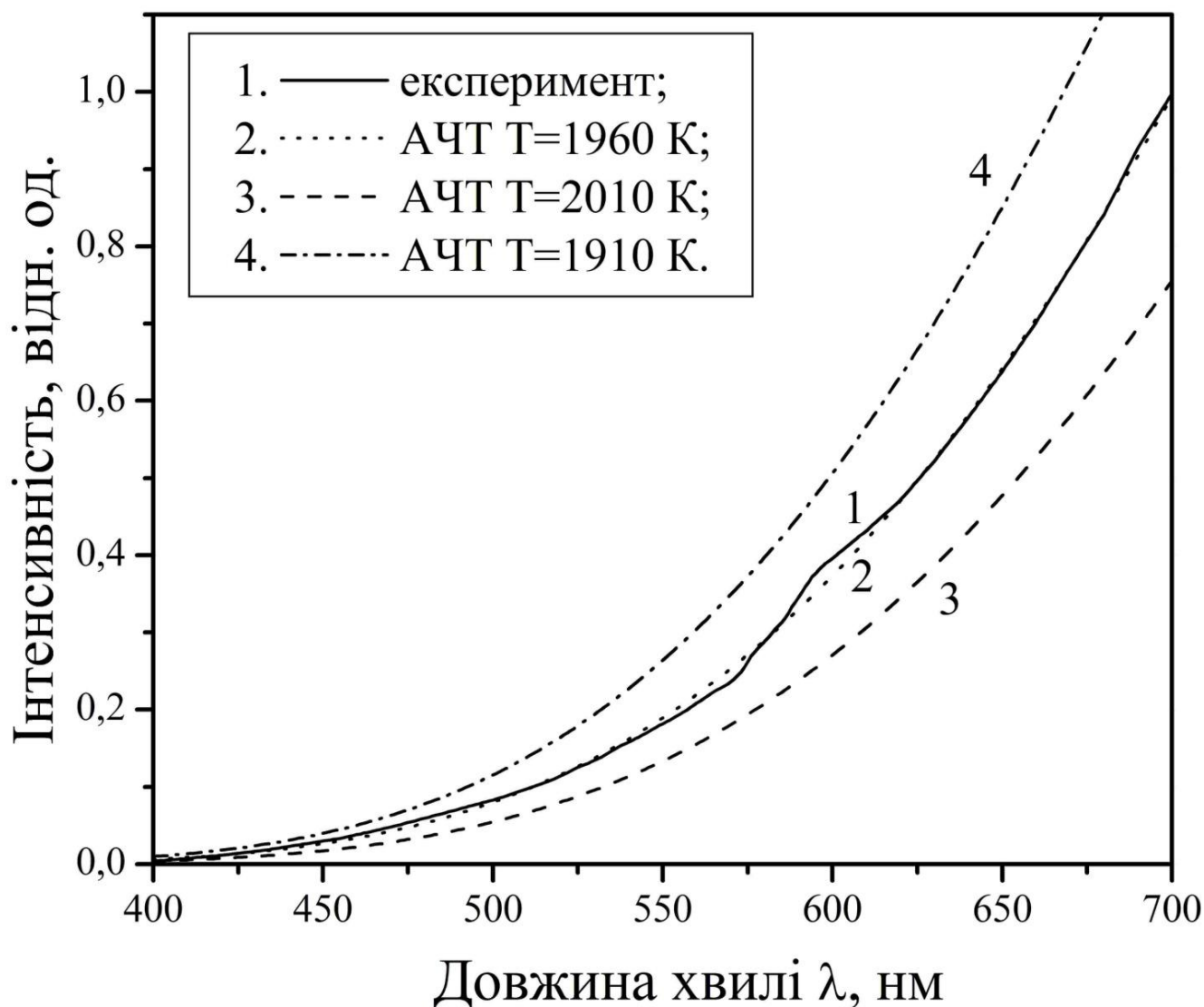


Рис.2.7. Спектр випромінювання галогенової лампи (1 – дійсний спектр випромінювання галогенової лампи, 2 – спектр отриманий в результаті проведеного експерименту, 3 – крива чутливості)

Якщо врахувати спектральну чутливість ФЕП, то при  $U=4$  В, була отримана крива 1 на рис.2.8. На цьому рисунку зображені криві спектра при випромінювання галогенової лампи при різних температурах, при чому найкраще узгодження спостерігається при температурі 1960 К.





*Рис. 2.8. Спектр випромінювання галогенової лампи при  $U=4\text{ В}$  (1– спектр отриманий в результаті проведеного експерименту, 2,3,4- спектр випромінювання при різних температурах)*

Виконуючи аналогічний експеримент, змінивши напругу, отримуємо наступний графік рис.2.9, де крива 1 відповідає дійсному спектру випромінювання галогенової лампи при  $U=5,5\text{В}$ . І відповідно на рис.2.10 зображено спектр випромінювання галогенової лампи при  $U=8\text{В}$ , де 1– спектр отриманий в результаті проведеного експерименту, 2,3,4- спектр випромінювання при різних температурах

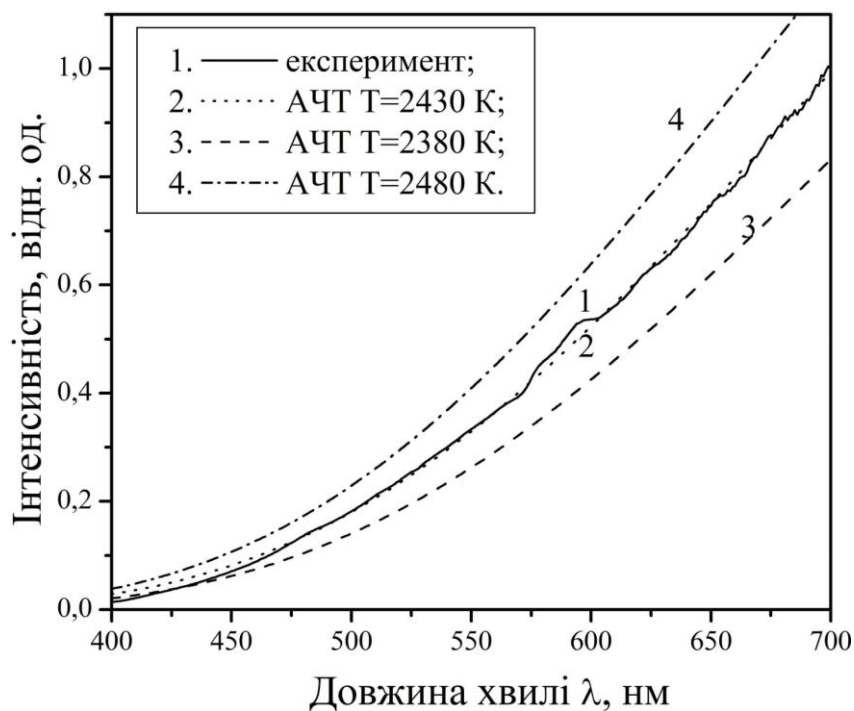


Рис.2.9 Спектр випромінювання галогенової лампи при  $U=5,5$  В (1– спектр отриманий в результаті проведеного експерименту, 2,3,4- спектр випромінювання при різних температурах)

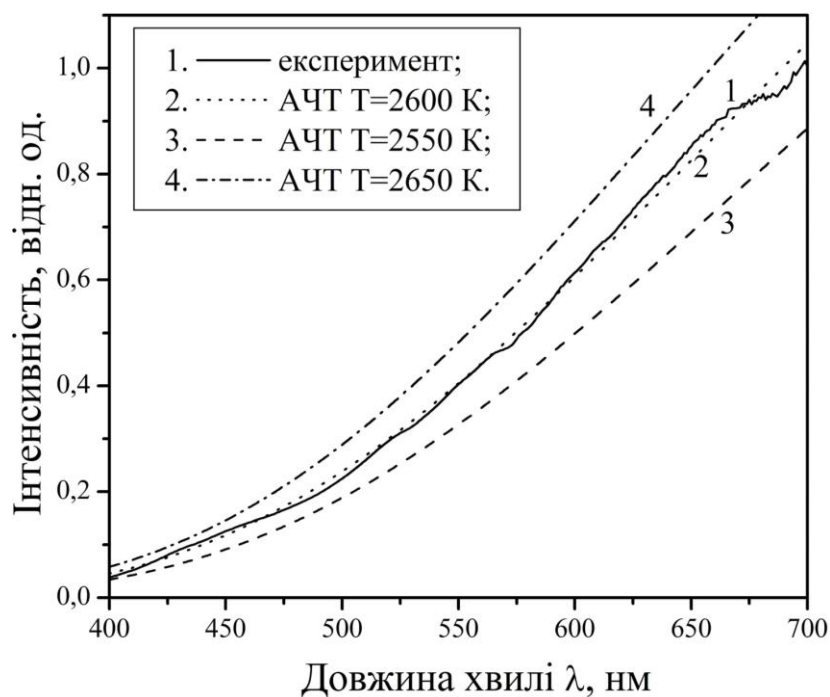
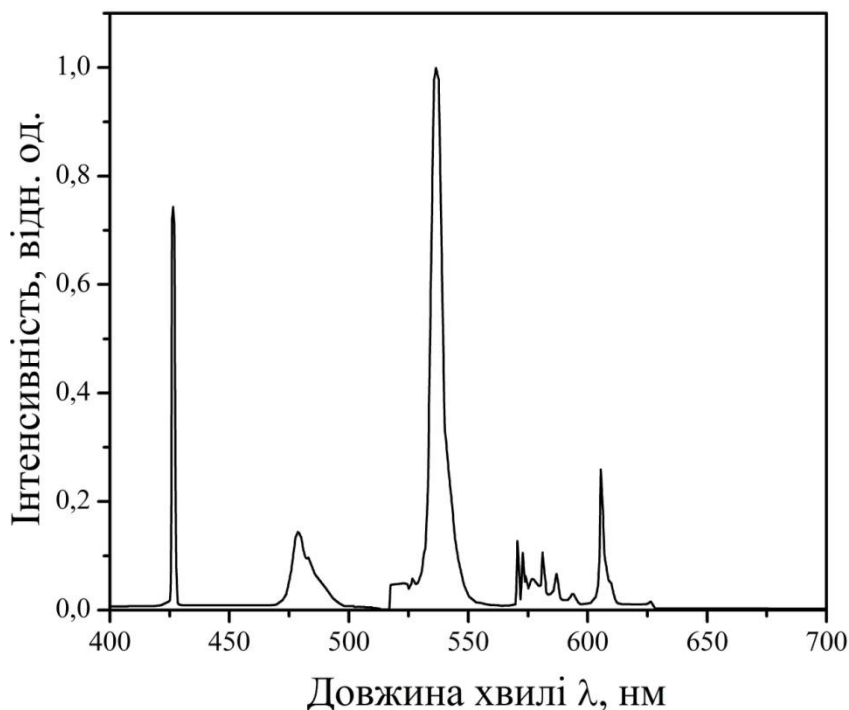
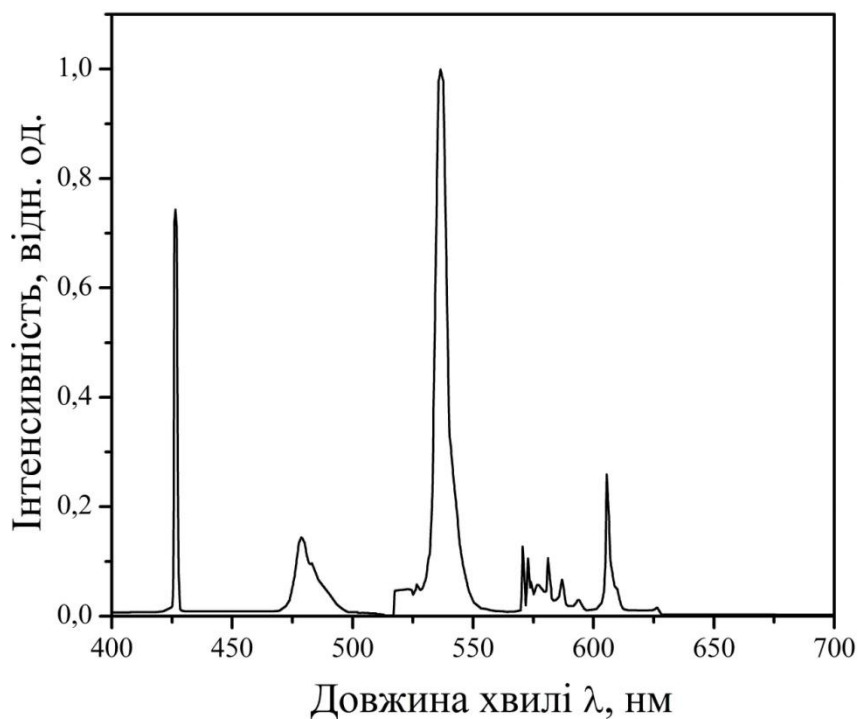


Рис.2.10. Спектр випромінювання галогенової лампи при  $U=8$  В (1– спектр отриманий в результаті проведеного експерименту, 2,3,4- спектр випромінювання при різних температурах)

За допомогою установки, схему якої наведено на рис.2.5. визначимо спектр випромінювання люмінесцентної лампи зображений на рис.2.11, а на рис.2.12 зображений спектр випромінювання з урахуванням кривої чутливості ФЕП.



*Рис.2.11. Спектр випромінювання люмінесцентної лампи (експеримент)*



*Рис 2.12. Реальний спектр випромінювання люмінесцентної лампи з урахуванням кривої чутливості*

По-суті спектр випромінювання люмінесцентної лампи має складний характер і не може бути описаний, як абсолютно чорне тіло чи сіре тіло. Відтак дані отримані пірометричним методом не є коректними.

Проводимо аналогічний експеримент і визначимо спектр випромінювання світлодіода. В даному випадку спектр випромінювання досліджуваної лампи, показаної на рис.2.13, крива 1 буде значно відрізнятися від АТЧ чи сірого тіла і представляє собою криву з двома максимумами на довжинах хвиль 450 нм та 550 нм. Очевидно, що і в даному випадку пірометричний метод є не коректним.

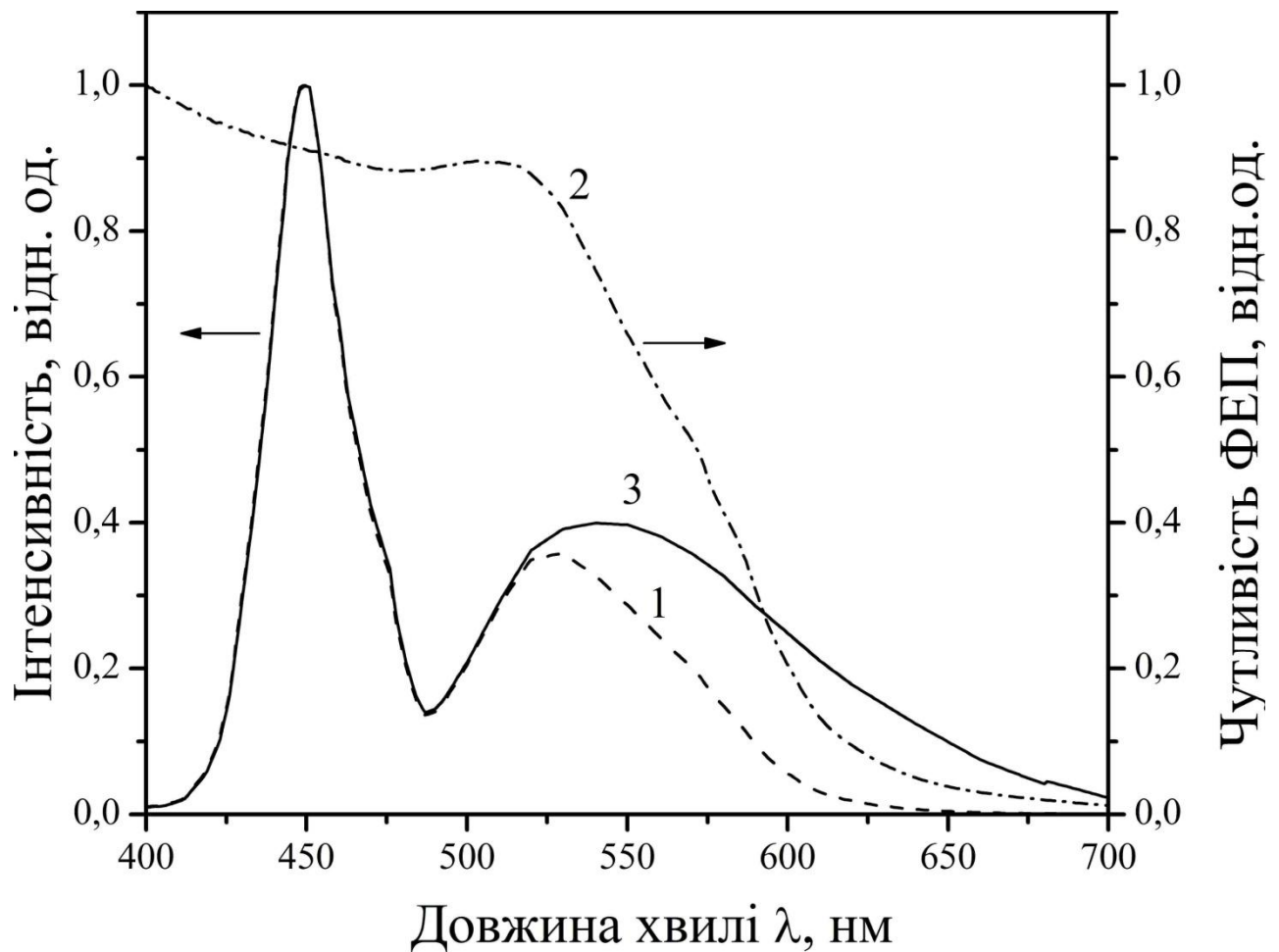


Рис. 2.13. Спектр випромінювання світлодіода(1- крива, отримана в результаті експерименту, 2-крива чутливості, 3-реальний спектр випромінювання лампи розжарення)

## 2.5 Вимірювання колірної температури джерел світла

Колірна температура джерела світла характеризує спектральний склад випромінювання джерела світла та основою об'єктивності враження від кольору відбиваючих об'єктів та джерел світла, тому визначає колір предметів, який відчуває людське око при спостереженні в даному світлі.

Визначимо за одержаними спектрами випромінювання (рис. 2.6) колірну температуру лампи розжарення.

Методика вимірювання колірної температури була розроблена Міжнародною комісією з освітлення в 1931 році. Тоді ж було введено поняття «стандартний спостерігач» та функції узгодження кольору, що характеризують сприйняття кольору середньостатистичною людиною. Дані функції представлені на рис.2.14.

Функції узгодження були підібрані таким чином, що для червоного  $\bar{x}$ , зеленого  $\bar{y}$  і синього  $\bar{z}$  кольорів відповідали монохроматичному світлі на всьому видимому спектрі випромінювання, причому функція узгодження зеленого кольору приймається рівною функції чутливості людського ока. Дані функції відображають той факт, що будь-який колір можна розділити на три безрозмірних складових.

Знаючи спектр випромінювання, можна підрахувати колірні параметри, необхідні для розрахунку колірної температури.

$$X = \int_{385}^{780} P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d(\lambda), \quad (8)$$

$$Y = \int_{385}^{780} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda), \quad (9)$$

$$Z = \int_{385}^{780} P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d(\lambda), \quad (10)$$

Для розв'язання даних інтегралів можна скористатися методом лівих прямокутників.

$$X = \int_{385}^{780} P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d(\lambda) = \sum_{i=0}^{n-1} (P(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i) (\lambda_{i+1} - \lambda_i)) \quad (11)$$

$$Y = \int_{385}^{780} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda) = \sum_{i=0}^{n-1} (P(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i) (\lambda_{i+1} - \lambda_i)) \quad (12)$$

$$Z = \int_{385}^{780} P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d(\lambda) = \sum_{i=0}^{n-1} (P(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i) (\lambda_{i+1} - \lambda_i)) \quad (13)$$

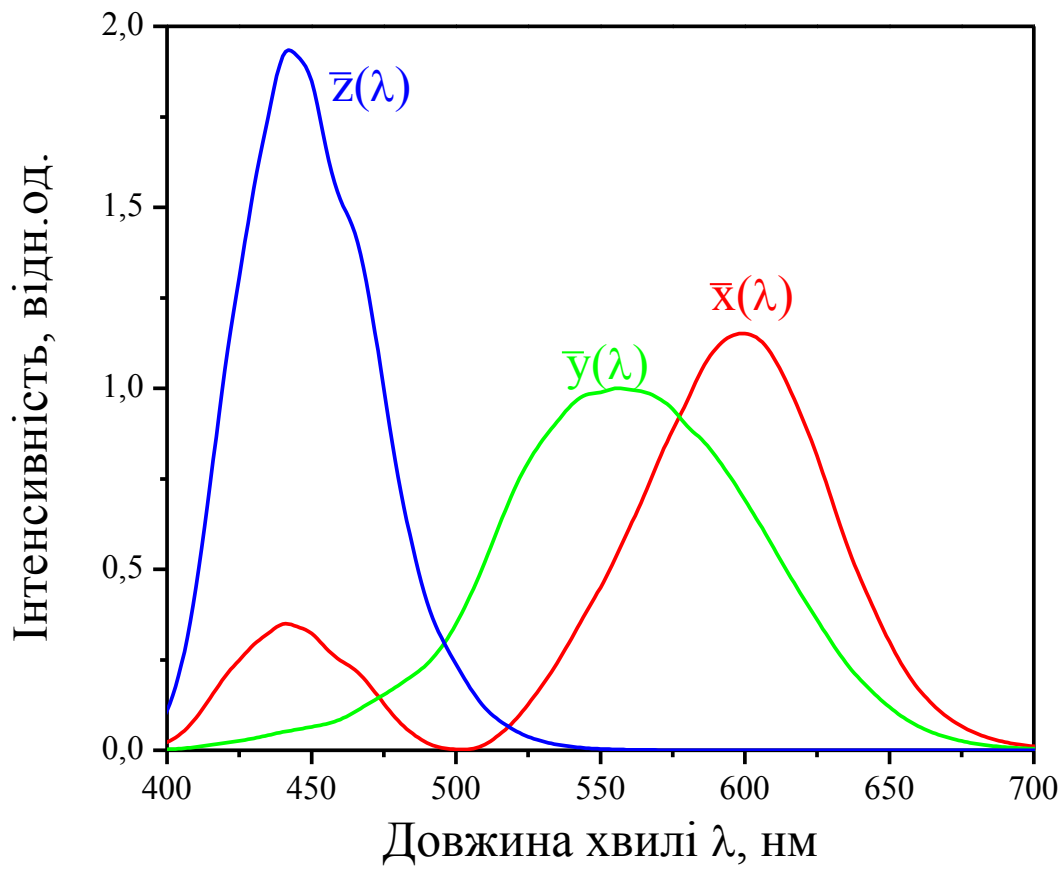


Рис.2.14. Функції узгодження кольору

Знаючи кольорові параметри  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , можна визначити координати кольоровості.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (14)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (15)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} = 1 - x - y \quad (16)$$

Необхідний для визначення кольорової температури параметр знаходиться з наступної формули.

$$P = \frac{x-0,332}{y-0,1858} \quad (17)$$

Кольорова температура знаходиться наступним чином.

$$T = 5520,33 - 6823,3 \cdot P + 3525 \cdot P^2 - 449 \cdot P^3 \quad (18)$$

Відтак для лампи розжарення  $P=0,77$ , а  $T=2140$  К.

Аналогічним чином визначаємо колірну температуру люмінесцентної лампи, використовуючи її спектр випромінювання зображений на рис.3.3,  $T=4300$  К (таб. 2.4).

У випадку світлодіода маємо високе значення колірної температури  $T=11400$  К. Це пов'язане з тим, що світлодіод має різний максимум в синьому діапазоні, що відповідає зсуві еквівалентного АТЧ, в бік коротких довжин хвиль з збільшенням температури джерела світла.

Вважається, що денному світлу відповідає температура  $T=6200$  К, серед досліджуваних джерел найбільш близькою до даної температури є люмінесцентна лампа. Дещо нижча колірна температура люмінесцентної лампи проявляється в тому, що людина сприймає її випромінювання більш м'яким з вираженою жовтою спектральною складовою.

Що стосується світлодіода, то висока колірна температура буде спостерігатися людиною, як холодний відтінок білого світла з явно вираженою спектральною складовою.

Таблиця 2.4

**Колірна температура різних джерел світла**

Лампа	Галогенові			люмінесцентна	розжарення	світлодіод
	U=4 В	U=5,5 В	U=8 В			
P	0,9	0,67	0,64	0,19	0,77	-0,64
T (K)	1900	2370	2480	4300	2140	11400

## ВИСНОВКИ

Дипломна робота присвячена оптичним методам вимірювання температури. Основні результати роботи полягають в наступному:

1. На основі аналізу літературних даних розглянуто поняття температури, температурні шкали та прилади для вимірювання температури.
2. Описано оптичні безконтактні методи визначення високих температур
3. Із застосуванням пірометра із зникаючою ниткою, визначено яскравісні температури лампи розжарення, світлодіода, люмінесцентної лампи та галогенової лампи.
4. Одержано спектри випромінювання досліджуваних джерел та показано, що спектр випромінювання світлодіода та люмінесцентної лампи істотно відрізняється від спектра випромінювання АТЧ та сірого тіла. Тому використання пірометричних методів для таких джерел не дає коректних результатів.
5. Запропоновано методику визначення колірної температури за спектром випромінювання джерел. Найбільш близькою до колірної температури денного світла виявлена люмінесцентна лампа з колірною температурою  $T=4300\text{ K}$ .
6. Визначили колірну температуру лампи розжарення, люмінесцентної лампи, світлодіода та галогенової лампи, використовуючи різні методи. У випадку галогенової лампи та лампи розжарення колірні температури значно менші і око сприймає таке випромінювання, як жовте, у випадку світлодіода навпаки колірна температура висока і спостерігач сприймає холодне біле випромінювання з наявністю фіолетової складової.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1. Ахманов С.А. Никитин С.Ю. Физическая оптика. – М.: Наука, 2004. – 654 с.
2. Базаров И. П., Термодинамика, М., Высшая школа, 1976, с. 13-14
3. Блинов О.М., Беленький А.М., Бердышев В.Ф. «Теплотехнические измерения и приборы», М.: «Металлургия», 1993
4. Вакуленко М. О. Тлумачний словник із фізики / М. О. Вакуленко, О. В. Вакуленко. – К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2008. – 767
5. Герцберг Г., Спектры и строение простых свободных радикалов, пер. с англ., М., 1974.
6. Денисов В. П., Мельников Ю. Ф. Технология и производство электрических источников света — М., Энергоатомиздат, 1983
7. Дойников А. С. Цветовая температура // Физическая энциклопедия / Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов, Б. К. Вайнштейн, С. В. Вонсовский, А. В. Гапонов-Грехов, С. С. Герштейн, И. И. Гуревич, А. А. Гусев, М. А. Ельяшевич, М. Е. Жаботинский, Д. Н. Зубарев, Б. Б. Кадомцев, И. С. Шапиро, Д. В. Ширков; под общ. ред. А. М. Прохорова. — М.: Советская энциклопедия, 1999. — Т. 5. — С. 422. — 692 с.
8. Жарковский Б.И. Приборы автоматического контроля и регулирования.- М.: Высшая школа, 1989.- 336 с
9. Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 232 с.
10. Исакович Р.Я. Технологические измерения и приборы. Изд. 2-е переработанное. – М.: Недра, 1979. – 344 с.
11. Калинин М.И., Кононогов С.А. Постоянная Больцмана, энергетический смысл температуры и термодинамическая необратимость / Измерительная техника. — 2005. — Т. 7.

12. Каплан С. А. Как возникла радиоастрономия // Элементарная радиоастрономия. — М.: Наука, 1966. — С. 12. — 276 с
13. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. —К, 1999.—532 с.
14. Кремлёвский Р.Я. Технологические измерения и приборы. Изд. 2-е переработанное. — М.: Недра, 1979. — 344с.
15. Ландсберг Г.С. Оптика. Издание 6-е. — М.: Физматлит, 2003. — 848 с.
16. Линевег Ф. Измерение температур в технике. Справочник. — Москва «Металлургия», 1980
17. Луцик О. Д., Иванова А. Й., Кабак К. С., Чайковський Ю. Б. Гістологія людини. — К.: Книга плюс, 2003. — 593
18. Матвеев А.Н. Оптика. — М.: Высш. шк., 1985. — 351 с.
19. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978. — 704 с.
20. Сергеев А.И., «Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация»», Магнитогорск:МГТУ, 1999.
21. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.4. Оптика. — М.: Наука, 1980. — 752 с.
22. Сивухин Д. В. Общий курс физики. — Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. — 5 изд., испр.. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 544 с.
23. Трофимов А.И., Ширяев А.А. Справочник слесаря КИП и А.- М.: Энергоатомиздат, 1986.- 256 с.
24. Фарзани Н.Г., Илясов Л.В., Азим-Заде А.Ю. Технологические измерения и приборы. М.: Высшая школа, 1989. — 456 с.
25. Федорченко А.М. (1993). Теоретична фізика. Квантова механіка, термодинаміка і статистична фізика. Т.2. Київ: Вища школа., 415 с.
26. Чистяков С.Ф., Радун Д.В. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978. — 215 с.

27. Чистяков В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
28. Чистяков С.Ф., Радун Д.В. «Технические измерения и приборы», М.: «Высшая школа» 1972
29. Шевцов Є.К., Ревун М.П. Основи метрології та електричні вимірювання. Навч. пос. – Запоріжжя: ЗДІА, 2001.- 205с.
30. Шпольский Э. В. Атомная физика (в 2-х томах). — М.: Наука, 1974. — Т. 1. — 576 с.
31. Шуберт Ф. Светодиоды. —М.: Физматлит, 2008. —496 с.
32. Яворский Б. М., Селезнев Ю. А. Справочное руководство по физике для поступающих в вузы и для самообразования. — 4-е изд., испр. — М.: Наука. — Гл. ред. физ-мат. лит., 1989 — 576 с.