Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Фізичний факультет
Кафедра загальної фізики

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри загальної фізики
проф. Лазоренко О.В.
«16» 06 » 2025 р.

Оцінка «5(добре)»
Голова ЕК
«19» 06 2025 р.

Цехмістро Дмитро Геннадійович

Методи оптичної пірометрії та їх використання

Кваліфікаційна робота
на здобуття освітньо-
кваліфікаційного рівня
«Бакалавр» за спеціальністю
104 Фізика та астрономія
освітньо-професійна
програма «Фізика»

Науковий керівник:
доцент кафедри
загальної фізики
к. т. н. Гресь В.Ю.

Рецензент :
професор кафедри
вищої математики
ХНУ ім. В.Н.Каразіна
д. ф.-м. н.
Чібісов Д.В.

Харків 2025

Анотація

Цехмистро Д.Г. Вивчення методів оптичної пірометрії та засобів їх використання. - Рукопис. Дипломна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» за спеціальністю 104 – «фізика та астрономія». – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2025.– 39 с. – табл. 1., рис. 9.

Розглянуті та проаналізовані методи оптичної пірометрії, які використовуються для безконтактного вимірювання температури, внаслідок чого мають важливі промислові та побутові застосування. Запропоновано лабораторну роботу з розділу «оптика» і її методичне забезпечення для загального практикуму фізичних факультетів. В роботі розглянуто конструкцію та принцип функціонування оптичного пірометра, за допомогою якого пропонується експериментальне визначення сталих теплового випромінювання. Надано теоретичний матеріал роботи, необхідний для виконання роботи, за допомогою експериментальних даних двома способами розраховано значення сталої Стефана – Больцмана та розраховані похибки проведеного досліду. Розглянута лабораторна робота та відповідне методичне забезпечення до неї дає можливість забезпечити якісний рівень знань і практичних навичок здобувачів освіти в умовах дистанційного навчання.

Ключові слова: теплове випромінювання, закон Стефана – Больцмана, стала Стефана – Больцмана, закони теплового випромінювання, оптичний пирометр, яркісна температура.

Anotation

Tsekhmistro D.G. Study of optical pyrometry methods and means of their use. - Manuscript. Bachelor's thesis for obtaining an educational and qualification level "Bachelor" in the specialty 104 - "Physics and Astronomy". - Kharkiv: V.N. Karazin National University, 2025. – 39 p. – Table 1, Fig. 9.

The methods of optical pyrometry used for non-contact temperature measurement have been examined and analyzed, resulting in significant industrial and household applications. A laboratory work on the topic of 'optics' and its methodological support for general practice in physics faculties has been proposed. The work discusses the design and operating principle of the optical pyrometer, through which experimental determination of the thermal radiation constant is suggested. The theoretical material necessary for the completion of the work has been provided, and the value of the Stefan-Boltzmann constant has been calculated in two ways using experimental data, as well as the errors of the conducted experiment. The discussed laboratory work and its corresponding methodological support enable a high level of knowledge and practical skills for students in the context of distance learning.

Keywords: thermal radiation, Stefan-Boltzmann law, Stefan-Boltzmann constant, laws of thermal radiation, optical pyrometer, brightness temperature.

ЗМІСТ

Найменування	№ стор.
Вступ	5
Розділ 1. Види випромінювань	6
1.1 Електромагнітне випромінювання. Джерела оптичного випромінювання	6
1.2. Теплове випромінювання та люмінесценція	8
1.3. Джерела світла	9
Розділ 2. Вимірювання температури. Оптична пірометрія	11
2.1. Температура та методи її вимірювання	11
2.2. Види температур в оптичній пірометрії	16
2.3. Методи оптичної пирометрії	20
2.4. Види пирометрів та їх вимірювальні характеристики	23
Розділ 3. Лабораторна робота «Визначення сталої Стефана – Больцмана за допомогою оптичного пірометра»	25
Опис установки	29
Порядок виконання роботи	32
Додаток 1. Приклад оформлення лабораторної роботи	33
Висновки	38
Список використаних джерел	39

ВСТУП

В умовах воєнного стану за допомогою дистанційного навчання вирішується багато проблем освіти в Україні. Дистанційне навчання не може повністю замінити очне, але в сучасних умовах воно стало дієвим способом викладання та засвоєння матеріалу. Враховуючи перспективи тривалого застосування цієї форми освіти у багатьох регіонах країни, важливо розробляти нові інструменти та методики навчання, в тому числі для проведення лабораторних і практичних занять.

Методи оптичної пірометрії є важливими інструментами для безконтактного вимірювання температури, особливо у випадках, коли традиційні термометри не можуть бути використані. Вони базуються на аналізі випромінювання об'єкта та дозволяють отримувати точні значення температури без фізичного контакту. Дипломна робота присвячена вивченню методів оптичної пирометрії та засобів їх використання.

Мета роботи полягає в розкритті особливості викладання лабораторного практикуму під час дистанційного навчання здобувачів освіти в умовах воєнного стану.

Об’єктом дослідження є розпечені тіла, температуру яких неможливо виміряти звичайними методами. Для цього необхідно застосування безконтактних методів.

Предметом дослідження є оптичні методи вимірювання температури, а саме оптичний пирометр, за допомогою якого можна виконати дану задачу. Це дуже важливо, наприклад, у промислових застосуваннях – в металлургії, при вирощуванні кристаллів розплавними методами (Чохральского, Киропулоса).

Розділ 1. Види випромінювань

1.1. Електромагнітне випромінювання. Джерела оптичного випромінювання

Електромагнітне випромінювання виникає в разі прискореного руху електричних зарядів. Електромагнітні хвилі вперше виявив та досліджував Г. Герц. Це було зроблено за допомогою випромінювача, в якому створювався іскровий розряд між зарядженою і заземленою металевими кулями, що дозволило генерувати хвилі в діапазоні 10 - 100 м. У своїх дослідах Герц здійснив отримання електромагнітних хвиль і відтворив з цими хвилями все явища, типові для будь-яких хвиль: утворення «тіні» позаду добре відбиваючих (металевих) предметів, відображення від металевих листів, переломлення в великий призмі, зробленої з асфальту, створення стоячій хвилі в результаті інтерференції хвилі, падаючої прямовисно (от весно) на металевий лист, із зустрічною хвилею, відбитою цим листом. Головним недоліком такого випромінювача були малий час коливань і велика ширина спектра частот випромінюваних хвиль.

За допомогою сучасних методів можна генерувати монохроматичні електромагнітні хвилі в діапазоні частот від радіо- до мікрохвиль. Діапазон радіохвиль використовують для радіомовлення (довгі, середні й короткі), телебачення і космічного зв’язку (ультракороткі хвилі). Радіолокація використовує мікрохвильовий діапазон. Збудження випромінювання з частотами, що перевищують межі мікрохвильового діапазону, неможливо здійснити за допомогою традиційних електронних методів. Отже, в лабораторному експерименті випромінювання оптичного діапазону отримують за допомогою методів, що ґрунтуються на фізичних явищах [1]:

1) світіння розжарених твердих чи рідких тіл (теплове випромінювання), що створює випромінювання суцільного спектра. Воно особливо ефективне в ближній інфрачервоній ділянці. Найліпшими джерелами суцільного випромінювання у видимій і ближній ультрафіолетовій ділянках є електрична дуга між електродами й електричний розряд в лампах високого тиску;

2) світіння збуджених газів. Створює дискретне випромінювання, складається з вузьких спектральних ліній. Прикладом джерела лінійного спектра, окремі лінії якого можна виділити за допомогою фільтрів, є ртутна лампа низького тиску. Значного поширення набули також безелектродні лампи, збуджувані низькочастотним розрядом [2];

3) світіння різних тіл під впливом випромінювання (фотолюмінесценція) або бомбардування електронним пучком (катодолюмінісценція).

Джерела оптичного випромінювання мають принципові відмінності від радіо- і низькочастотних джерел. Випромінювання електромагнітних хвиль радіодіапазону утворюється внаслідок прискореного руху електронів у антенах радіопередавачів. У цьому процесі всі електрони в антені рухаються синхронно, здійснюючи вимушені коливання з однаковою фазою. Такі коливання можна тривалий час підтримувати на стабільній частоті, внаслідок чого утворюються монохроматичні (когерентні) хвилі. Це забезпечує високий рівень узгодженості випромінювання.

Натомість, джерела оптичного випромінювання, наприклад, розжарені тіла чи гази, збуджені електричним розрядом, мають зовсім інший принцип роботи. Такі джерела складаються з великої кількості збуджених атомів, кожен із яких випромінює хвильові цуги кінцевої довжини. Через незалежність актів спонтанного випромінювання світла окремими атомами, довжини хвиль можуть бути однаковими, але їх фази є випадковими і постійно змінюються.

Результатом цього є те, що випромінювання звичайних оптичних джерел — це накладання великої кількості хвильових цугів, які не узгоджені між собою. Вони формують некогерентне випромінювання, що фактично є "світловим шумом". Такий характер випромінювання пояснює, чому оптичне світло є хаотичним і не має чіткої узгодженості електромагнітного поля, як це спостерігається у випадку радіохвиль.

1.2. Теплове випромінювання та люмінесценція

Теплове випромінювання - електромагнітне випромінювання, що випромінюється речовиною і виникає за рахунок його внутрішньої енергії. Воно обумовлено збудженням частинок речовини при зіткненнях у процесі теплового руху або прискореним рухом зарядів (коливання іонів кристалічних грат, тепловий рух вільних електронів тощо). Теплове випромінювання притаманне всім тілам при температурі вище 0 К і має суцільний спектр частот. Інтенсивність випромінювання та спектральний склад залежать від температури тіла, тому не завжди теплове випромінювання сприймається оком як свічення. Наприклад, тіла, нагріті до високої температури, значну частину енергії випускають у видимому діапазоні, а при кімнатній температурі майже вся енергія випромінюється в інфрачервоній частині спектра. При цьому випромінювання всіх довжин хвиль зумовлено коливаннями електричних зарядів, які входять у склад речовини, тобто іонів та електронів. Коливання іонів дає випромінювання з низькими частотами (інфрачервоне) внаслідок їхньої значної маси. Рух електронів, що входять до складу атомів або молекул, створює високочастотне випромінювання (видиме та ультрафіолетове). Випромінювання супроводжується втратою енергії тілом. Поповнення енергії може здійснюватися різним способом. При тепловому випромінюванні енергія поповнюється з допомогою нагрівання тіла. Теплове випромінювання - єдиний вид випромінювання, який є рівноважним. Усі інші види випромінювань – нерівноважні.

Всі види випромінювань, які збуджуються за рахунок будь-якого виду енергії, крім теплової (хімічної реакції, освітлення, електричного розряду та інші), об'єднуються під загальною назвою **люмінесценції.** Люмінесценція є випромінювання світла холодними тілами, тобто це випромінювання нетеплового походження. З молекулярної точки зору це явище, що виникає в результаті переходу молекул із збудженого стану до основного. Люмінесценція може бути розглянута як перевищення випромінювання тіла над температурним

випромінюванням того ж тіла у даній частині спектра та при даній температурі. Вона також характеризується кінцевою тривалістю свічення – не зникає відразу після переривання збудження. За фактором збудження світіння розрізняють різні види люмінесценції:

- фотолюмінесценція, де фактором збудження є електромагнітне випромінювання видимого, УФ або ІЧ-діапазону. Величина випромінюваної енергії зазвичай менше, ніж енергії збудження;
- хемілюмінесценція - світіння збуджується за рахунок хімічних реакцій;
- біолюмінесценція – збудження світіння з допомогою біохімічних реакцій. Можна спостерігати на прикладі світляків. Всі живі організми мають здатність до біолюмінесценції, але зазвичай вона занадто слабка, щоб бути помітною;
- електролюмінесценція, при якій збудження молекули твердого тіла відбувається у змінному чи постійному електричному полі. Електролюмінесценція газів відбувається під час електричних розрядів. Явище використовується в люмінесцентних лампах, електролюмінесцентних конденсаторах та перетворювачах зображення;
- рентгенолюмінесценція, є випромінювання світла, викликане рентгенівським випромінюванням. Наприклад, на цьому явищі засновані підсилювальні екрани, які використовують для покращення якості фотографій.

Існує безліч інших типів люмінесценції – радіо-, катодо-, соно-, трибо- та термо-люмінесценція.

1.3. Джерела світла

З фізичної точки зору, джерелом світла може бути названа будь-яка матеріальна система, що випромінює електромагнітну енергію в оптичній області спектра. У техніці джерелами світла називають прилади, що служать для перетворення будь-якого виду енергії на енергію оптичного випромінювання.

Джерела світла можуть бути природними та штучними. До природних належать зірки, блискавка, світлячки тощо. Штучні – це свічка, електрична лампочка тощо. В даний час існує п'ять типів джерел світла:

• Лампи розжарювання

• Галогенні лампи

• Люмінесцентні лампи

• Лампи високого тиску

• Світлодіодні лампи

Принцип дії ламп розжарювання полягає у розігріванні вольфрамової спіралі, поміщеної у колбу. Практика показала, більшість енергії ламп розжарювання витрачається не так на освітлення, але в нагрівання. Як правило, термін служби їх не перевищує 1000 годин. Незважаючи на те, що сьогодні людство поступово відмовляється від неекономічних ламп розжарювання, у світі продається близько 15 мільярдів таких джерел освітлення на рік. Причиною цього є звичка та низька вартість виробу.

Галогенні лампи розжарювання – це сучасний тип ламп розжарювання, який добре знайомий дизайнерам інтер'єрів. Нові технологічні рішення, такі як додавання в колбу лампи галогенідів, використання спеціального кварцевого скла, відбивачів, дозволили галогенним лампам зайняти окремий клас джерел світла. Завдяки встановленим відбивачем стало можливим керувати шириною променя. Тим не менш, очевидним є недолік даного джерела світла: нагрівання при роботі, що звужує сферу застосування. Крім того, галогенні лампи характеризуються відносно нетривалим терміном служби: 2000-4000 годин.

Люмінесцентні лампи є розрядними лампами низького тиску, виконані у вигляді циліндричної трубки з електродами, в яку закачано пари ртуті. Принцип дії полягає у появі електричного розряду та впливу його на пари ртуті, які випромінюють УФ-промені, тим самим впливаючи на люмінофор, нанесений на стінки трубки. У свою чергу, люмінофор випромінює видиме світло. Головна перевага таких джерел світла – тривалий термін служби: до 20 000 годин. Однак

люмінесцентні джерела світла залежать від температури навколишнього середовища, що обмежує сферу їх використання.

Принцип дії **розрядних ламп високого тиску** полягає у світінні наповнювача, що знаходиться в розрядній трубці, під дією електричних дугових розрядів. Характеристики даних джерел світла можна варіювати у разі зміни складу газу в камері нагнітання. Серед переваг розрядних ламп високого тиску можна виділити високу світлову віддачу, відносну низьку вартість та швидкі терміни окупності. Недоліком є невисока стабільність параметрів протягом терміну експлуатації, проте сьогодні це долається за допомогою ламп з керамічним пальником.

Світлодіодні джерела світла – це напівпровідникові прилади, що складаються з двох напівпровідників, з'єднаних між собою. При проходженні струму, один із матеріалів отримує надлишок електронів, а інший – недолік їх. Електрони починають переходити на вакантні місця, генеруючи тим самим світло та тепло. Сьогодні світлодіоди є лідерами в автомобільній, авіаційній техніці та світлосигнальній апаратурі [2]. Крім того, вони характеризуються високим потенційним терміном служби та можливістю налаштування. Тим не менш, світлодіодні джерела світла мають свої недоліки: ефективність і термін служби залежать від температури з'єднання.

Розділ 2. Вимірювання температури. Оптична пірометрія

2.1. Температура та методи її вимірювання

Температура — це фізична величина, що дозволяє характеризувати тепловий стан об'єкта та його теплову енергію. У кожному рівноважному стані тіла існує певний параметр, який відображає його температуру. Цей параметр збільшується зі зростанням температури, і його числове значення називається температурою. Температура також є ключовим показником теплової рівноваги між двома системами, що перебувають у тепловому контакті.

Закон термодинамічної рівноваги стверджує, що якщо кілька систем (три або більше) знаходяться в тепловому контакті й досягають стану теплової рівноваги, то будь-які дві з цих систем також будуть у тепловій рівновазі між собою. Це означає, що температури всіх систем у контакті вирівнюються.

Для кожного стану рівноваги тіла можна визначити специфічний параметр, який відображає його температуру. Значення температури є числовим виразом цього параметра, яке зростає зі збільшенням температури. Температура характеризує теплову енергію тіла, а також рівновагу між двома системами, що перебувають у тепловому контакті. Якщо кілька систем (три або більше) досягають стану теплової рівноваги, то будь-яка пара цих систем також буде у рівновазі одна щодо одної. Одна з таких систем, яку називають термометром, контактує з іншими для визначення їх теплових станів — чи є вони однаковими чи різними.

Термометричне тіло — це об'єкт, за допомогою якого вимірюється температура іншого тіла. Наприклад, датчик термометра контактує з об'єктом, температуру якого необхідно виміряти. Протягом певного часу, достатнього для встановлення теплової рівноваги, температури термометричного тіла й досліджуваного об'єкта зрівнюються. На основі показань термометра можна визначити температуру об'єкта.

Для вимірювання температури використовуються різні термометричні ознаки — фізичні властивості, які змінюються залежно від температури. До таких ознак належать:

1) зміни об'єму газу чи рідини,

2) електричний опір матеріалів,

3) різниця електричного потенціалу між двома провідниками.

Відповідно, прилади, які базуються на цих принципах, включають газові, ртутні термометри, термометри з термоопором або термопарою. Ці пристрої дозволяють точні вимірювання температури в різних фізичних умовах.

Термометрія [3] виконує дві основні функції: забезпечує максимально точне вимірювання температури фізичних систем і встановлює шкали для кількісної оцінки температури. Температура є важливим параметром, який дає змогу оцінити стан теплової енергії тіла. Щоб правильно виміряти температуру, необхідно обрати еталонне тіло. Це еталон має мати певні властивості: рівноважний стан і легкість у відтворенні тих самих умов. Саме цей еталон отримує визначене значення температури, яке служить реперною точкою на температурній шкалі.

Температурна шкала є впорядкованою послідовністю значень температури, яка дозволяє систематизовано і кількісно визначати тепловий стан тіл. Її створення дає можливість зіставляти та вимірювати температури різних об'єктів навіть у непрямий спосіб — через вимірювання змін фізичних параметрів, які залежать від температури. До таких параметрів належать, наприклад, об'єм газів, довжина чи об'єм рідин, електричний опір матеріалів, а також різниця потенціалів на межі поділу провідників.

Розробка та використання температурних шкал є ключовою складовою термометрії. Відомі приклади температурних шкал включають шкали Цельсія, Кельвіна та Фаренгейта, які широко застосовуються для наукових та прикладних цілей. Шкала Кельвіна є абсолютною шкалою, де абсолютний нуль (0 K) є початком відліку. Шкала Цельсія базується на двох реперних точках: температура танення льоду (0 °C) і кипіння води (100 °C) за нормальних умов. Шкала Фаренгейта популярна у Сполучених Штатах і ґрунтується на власних реперних точках Фаренгейта.

Температурні вимірювання є основою для безлічі наукових і прикладних завдань, від контролю стану промислових процесів до вивчення природних явищ. Завдяки термометрії ми можемо оцінювати та розуміти теплові процеси, розробляти ефективні технології та забезпечувати комфорт у повсякденному житті.

Однією з перших спроб створити температурну шкалу можна вважати роботу Роберта Гука, виконану в 1664 році. Його температурна шкала передбачала, що один градус відповідав зміні об'єму рідини, яка використовувалась у термометрі, на 1/500. Це відповідає приблизно 2,4 °C на сучасних шкалах. Початком шкали Гука було прийнято температуру найбільшого зимового холоду (-7 градусів), а її верхня межа визначалася як температура найбільшого літнього тепла (+13 градусів). Ця шкала була нанесена на термометри, створені за його методом, і стала однією з перших спроб кількісно вимірювати температуру.

Подальший розвиток температурних шкал ґрунтувався на властивостях води, зокрема на температурах танення льоду та кипіння води за нормального атмосферного тиску. Ці температурні точки стали реперними точками для багатьох відомих температурних шкал:

-шкали Цельсія (°C), запропонованої Андерсом Цельсієм, яка використовує 0 °C як температуру танення льоду і 100 °C як температуру кипіння води.

-шкали Кельвіна (K), створеної Вільямом Томсоном (лордом Кельвіном). Є абсолютною температурною шкалою, де нуль (0 K) відповідає абсолютному нулю, тобто температурі, за якої припиняється тепловий рух частинок.

Внесок Даніеля Габріеля Фаренгейта також є визначним. У 1724 році він запропонував шкалу, де як ключові точки були обрані температура танення льоду (32 градуси) і температура людського тіла (96 градусів). Шкала Фаренгейта широко використовується в США і залишається популярною у побуті.

Окрім вищезазначених шкал, сьогодні також використовуються:

-шкала Реомюра (R), в якій 0 °R відповідає температурі танення льоду, а 80 °R — температурі кипіння води.

-шкала Ранкіна (Ra), що є абсолютною шкалою, подібною до шкали Кельвіна, але значення температури виражаються в градусах Фаренгейта.

Взаємозв'язки між цими шкалами можна описати математичними співвідношеннями, які дозволяють перераховувати значення температури між ними. Наприклад:

$n,^0C = (n-273)$ K; $1,8n,^0C = 32^0$ F; $n,^0C = 0,8n^0$ R; n K = $1,8n^0$ Ra.

Ці температурні шкали використовуються у різних галузях, від побутових завдань до точних наукових вимірювань. Завдяки такій різноманітності температурні шкали залишаються одним із ключових інструментів для розуміння та вимірювання теплових процесів. Температурні шкали Реомюра та Фаренгейта застосовують і нині у США, Великобританії та деяких інших країнах.

Після впровадження Міжнародної системи одиниць (СІ) були рекомендовані дві основні температурні шкали, які використовуються для точного вимірювання температури: термодинамічна та міжнародна практична шкала.

Термодинамічна шкала є основою точного визначення температури в науці та техніці. Вона не залежить від властивостей речовини, що використовується як робоче тіло, і базується на теоретичних принципах, таких як цикл Карно. Ця шкала названа на честь англійського фізика Вільяма Томсона (лорд Кельвін), який зробив значний внесок у розвиток термодинаміки. У термодинамічній шкалі збережено одиницю температури, що відповідає одній одиниці в шкалі Цельсія, але її початок зміщений до абсолютного нуля, що відповідає 0 К. Абсолютний нуль — це точка, у якій припиняється тепловий рух частинок.

Міжнародна практична шкала була створена для забезпечення зручності й точності вимірювань у практичних застосуваннях. Її ключовою особливістю є наявність 11 реперних точок, що відповідають температурам фазових переходів (наприклад, танення, кипіння) низки чистих речовин. Значення цих реперних точок постійно уточнюються в міру вдосконалення наукових знань і технічних методик. Одиницею температури в цій шкалі також є 1 К.

Обидві шкали використовують як основну реперну точку **потрійну точку води**. Це унікальний стан, за якого вода може одночасно існувати у трьох фазах — твердому, рідкому та газоподібному. Потрійна точка води має конкретне значення температури (273,16 К) і тиску (609 Па). Завдяки цим чітко визначеним характеристикам, потрійна точка води є універсальною для калібрування температурних приладів.

Система СІ визначає температуру потрійної точки води як стандарт, оскільки цей стан є незалежним від властивостей використовуваної речовини і забезпечує високу точність вимірювань. Саме тому термодинамічна та міжнародна практична шкали узгоджуються через цю реперну точку.

Узагальнюючи, термодинамічна шкала спрямована на теоретичні та фундаментальні дослідження, тоді як міжнародна практична шкала забезпечує зручність і точність для реального використання. Обидві шкали залишаються ключовими інструментами в сучасній науці, техніці й повсякденному житті.

2.2. Види температур в оптичній пірометрії

Закони теплового випромінювання дозволяють вимірювання температури тіл, коли не можна користуватися звичайними методами (термометрами, термопарами). Це стосується тіл:

- розпечених;
- які самостійно світяться;
- віддалених від спостерігача (наприклад, зірок),

У цих випадках можна судити про температуру тіла тільки з його випромінювання. Сукупність безконтактних методів вимірювання високих температур, заснованих на законах теплового випромінювання (використанні залежності спектральної густини енергетичної світності, або енергетичної світності досліджуваного тіла від температури), називається ***оптичною пірометрією***, а прилади, що застосовуються для цієї мети, називаються

оптичними пірометрами. При вимірах даним методом досягається рівноважний стан термодинамічної системи, що складається з самого пірометра та теплового випромінювання, яке він приймає. Оптична пірометрія використовується в металургії для вимірювання температури розплаву та прокату, в лабораторних та виробничих процесах, де необхідним є вимірювання температури нагрітих газів – наприклад, при вирощуванні кристалів, а також при дослідженнях плазми. В оптичній пірометрії розрізняють наступні температури тіла: радіаційну, колірну, яскраву.

Радіаційна температура Тр тіла - це температура абсолютно чорного тіла, за якої його енергетична світність R дорівнює енергетичній світності R_m даного тіла в широкому діапазоні довжин хвиль. Якщо ж виміряти потужність, випромінювану деяким тілом з одиниці поверхні в досить широкому інтервалі хвиль і її величину зіставити з енергетичною світністю абсолютно чорного тіла, можна, використовуючи формулу закона Стефана – Больцмана (2.1), обчислити температуру цього тіла:

$$T_p = \sqrt[4]{\frac{R_m}{\sigma}} \quad . \qquad (2.1)$$

Визначена таким способом температура Тр досить точно відповідатиме істинній температурі Т при виконанні двох умов:

-оптична система та детектор випромінювання повинні мати однакову чутливість у широкому діапазоні довжин хвиль, що відповідає основній випромінюваної потужності поверхні тіла;

-коефіцієнт монохроматичного поглинання поверхні тіла повинен бути близький до одиниці.

Для сірого тіла закон Стефана-Больцмана може бути записаний у вигляді

$$R_m(T) = \alpha(T)\sigma T^4, \qquad (2.2)$$

де $\alpha(T)$ <1.

Підставляючи цей вираз у формулу (2.1), отримаємо

$$T_p = T\sqrt[4]{\alpha(T)} \quad . \qquad (2.3)$$

З (2.3) випливає, що для сірого тіла радіаційна температура виявляється завжди нижчою від істинної (Тр <Т).

Колірна температура тіла. Спектральна густина енергетичної світності сірих тіл (або тіл близьких до них за властивостями) з точністю до постійного коефіцієнта (коефіцієнта монохроматичного поглинання) пропорційна спектральній густині енергетичної світності абсолютно чорного тіла. Отже, розподіл енергії в спектрі сірого тіла такий самий, як і в спектрі абсолютно чорного тіла при тій же температурі. Для визначення температури сірого тіла достатньо виміряти потужність $I(\lambda,T)$, що випромінюється одиницею поверхні тіла у досить вузькому спектральному інтервалі (пропорційну $r(\lambda,T)$), для двох різних хвиль. Відношення $I(\lambda,T)$ для двох довжин хвиль дорівнює відношенню залежностей $f(\lambda,T)$ для цих хвиль, вид яких описує формула (2.4):

$$\frac{I(\lambda_1,T)}{I(\lambda_2,T)} = \frac{r(\lambda_1,T)}{r(\lambda_2,T)} = \frac{f(\lambda_1,T)}{f(\lambda_2,T)} \qquad (2.4)$$

З цієї рівності можна математичним шляхом отримати температуру Т. Отримана таким чином температура називається ***колірною***. Колірна температура тіла, визначена за формулою (2.4), відповідатиме істинній, якщо коефіцієнт монохроматичного поглинання не сильно залежить від довжини хвилі. В іншому випадку поняття колірної температури втрачає сенс. Колірна температура сірого тіла збігається із справжньою температурою і може бути знайдена також із закону зміщення Вина.

Таким чином, колірна температура Тк тіла - це температура абсолютно чорного тіла, при якій відносні розподіли спектральної густини енергетичної

світності абсолютно чорного тіла і тіла, що розглядається, максимально близькі у видимій області спектру. Зазвичай визначення кольорової температури вибирають довжини хвиль λ_1=655 нм (червоний колір), λ_2= 470 нм (зелено-блакитний колір).

Прикладом використання випромінювання чорного тіла є оцінка поверхневої температури Сонця, яке можна вважати абсолютно чорним тілом. Область максимального випромінювання Сонця посідає довжину хвилі λ_{max} = 480 нм, тому за формулою Вина можна знайти температуру поверхні Сонця - колірну температурою ($T_ц$ = 5800 К). Використання закону Стефана - Больцмана (2.1) дозволяє за енергією випромінювання абсолютно чорного тіла визначити його істинну температуру. Закон Кірхгофа (2.4) дозволяє проводити аналіз шарів речовини, що випромінюють світло (якщо шари досить гарячі) або поглинають світло, що проходить (якщо шари холодні). Знаючи, який спектр відповідає тій чи іншій речовині (а всі атомні або молекулярні спектри індивідуальні), можна за спектрами випромінювання або поглинання судити про хімічний склад тіла. Цей спосіб [2] послужив основою широко використовуваного спектрального дослідження речовин. Так, за допомогою спектрального аналізу був відкритий на Сонці гелій, а астрономи переконалися в тому, що до складу небесних тіл входять ті ж речовини, що зустрічаються і на Землі. Світіння розпечених тіл використовується для створення ламп розжарювання, дугових ламп.

Яскрава температура Тя тіла – це температура абсолютно чорного тіла, при якій його спектральна густина енергетичної світності f(λ,T) для якоїсь певної довжини хвилі дорівнює спектральної густині енергетичної світності r(λ,T) даного тіла для тієї ж довжини хвилі. Оскільки для нечорного тіла спектральна густина енергетичної світності за певної температури буде завжди нижчою, ніж у абсолютно чорного тіла, то справжня температура тіла буде завжди вищою за яскраву.

2.3. Методи оптичної пірометрії

Розглянемо деякі методи оптичної пірометрії. Метод ***яскравої пірометрії*** (називається також радіаційною пірометрією, пірометрією від випромінювання) використовує залежність енергетичної яскравості випромінювання об'єкта в обмеженому діапазоні довжин хвиль від температури [4]. Принцип визначення температури заснований на візуальному порівнянні яскравості розжареної нитки лампи пірометра з яскравістю зображення об'єкта, що досліджується. Рівність яскравостей, що спостерігається через монохроматичний світлофільтр (зазвичай вимірювання проводять на довжині хвилі λ= 660 нм), визначається по зникненню зображення нитки пірометричної лампи на тлі зображення розжареного об'єкта. Розпал нитки лампи пірометра регулюється реостатом, а температура нитки визначається за графіком, або таблиці. Якщо температура нитки висока, то ослаблення потоку випромінювання застосовується також і нейтральний світлофільтр.

Нехай в результаті вимірювань ми отримали рівність яскравостей нитки пірометра та об'єкта, що досліджується, і за графіком визначили температуру нитки пірометра T_1. Тоді можна записати:

$$f(\lambda, T_1)\alpha_1(\lambda, T_1) = f(\lambda, T_2)\alpha_2(\lambda, T_2), \qquad (2.5)$$

де $\alpha_1(\lambda, T_1)$ і $\alpha_2(\lambda, T_2)$ - коефіцієнти монохроматичного поглинання матеріалу нитки пірометра та досліджуваного об'єкта відповідно, T_1 та T_2 – температури нитки пірометра та об'єкта. З рівняння (2.5), рівність температур об'єкта і нитки пірометра будуть спостерігатися тільки тоді, коли будуть рівні їхні коефіцієнти монохроматичного поглинання в області спектру, що спостерігається:

$$\alpha_1(\lambda, T_1) = \alpha_2(\lambda, T_2). \qquad (2.6)$$

Якщо $\alpha_1(\lambda, T_1) > \alpha_2(\lambda, T_2)$**,** ми отримаємо занижене значення температури об'єкта, при зворотному співвідношенні - підвищене значення температури. Отже, вимірявши яскравість випромінювання об'єкта, ми можемо виміряти (з тією чи іншою точністю) значення температури об'єкта. Таким чином, ключовим елементом радіаційного пірометра є приймач випромінювання, що перетворює енергію випромінювання, що приходить на нього, в іншу фізичну величину, найчастіше в струм або в напругу. Його доповнюють оптична система, що збирає у певному тілесному куті випромінювання від об'єкта, і електронна схема з системами живлення та індикації, що підсилює, перетворює і відображає результат вимірювання.

Метод ***оптичної кольорової пірометрії*** спочатку ґрунтувався на залежності спектрального розподілу потоку випромінювання нагрітого об'єкта від температури в діапазоні видимих довжин хвиль - залежності кольору випромінювання нагрітого об'єкта від температури [5]. Об'єкти, нагріті до 700–800°С, світять темно-оранжевим світлом, при 1000–1200°С колір світіння стає яскраво-оранжевим, поступово переходячи в жовтий, при 2000°С колір сприймається людським оком як яскраво-жовтий, а після 2500°С світіння наближається до білого кольору. Довгий час основними елементами колірного порівняння були очі оператора і нагріта нитка розжарення (або спіраль), розташована в окулярі пірометра в полі зору оператора. Нитку в окулярі суміщали з зображенням вимірюваного об'єкта. Регулюючи електричний струм, що проходить через напружену нитку, оператор підбирав таке його значення, щоб колір нитки збігався з кольором вимірюваного об'єкта. При певному

значенні струму зображення нитки "зникало" на тлі нагрітого об'єкта, що було критерієм рівності температури об'єкта та нагрітої нитки. Звідси пішла і назва подібних пірометрів - ***пірометри з ниткою, що зникає***.

З огляду на особливості людського зору описаний метод має серйозні обмеження в точності та повторюваності результатів вимірювань. Тому надалі суб'єктивні візуальні вимірювання були витіснені вимірюваннями за допомогою кількох приймачів випромінювання, що працюють у різних спектральних діапазонах. Таких приймачів може бути багато, але на практиці найчастіше обмежуються двома. Даний метод заснований на залежності відношення енергетичних яскравостей об'єкта у двох різних областях спектру випромінювання від температури та називається методом ***пірометрії спектрального відношення*** або методом спектральної пірометрії. Пірометри спектрального відношення визначають температуру об'єкта по відношенню до сигналів від двох приймачів, що працюють на різних довжинах хвиль. Такий принцип вимірювання температури дозволяє позбутися більшості недоліків, властивих пірометрам яскравості. Відстань однаково впливає на сигнал для обох приймачів пірометра спектрального відношення, тому вона не змінює співвідношення отриманих сигналів.

Форма об'єкта, що вимірюється, запиленість і загазованість проміжного середовища однаково впливають на сигнали з обох приймачів, залишаючи незмінним їх відношення. Вимірювальна процедура полягає в реєстрації безперервного спектра випромінювання в широкому інтервалі довжин хвиль, порівнянні отриманого спектру зі спектром чорного випромінювача, знаходженні ділянок, де ці спектри подібні і визначенню температури як параметра розподілу інтенсивності в спектрі. В даний час спектральна пірометрія є найбільш перспективним напрямом оптичної пірометрії, який швидко розвивається, в якому нестача вихідних даних про властивості об'єкта компенсується широкою інформацією, що одержується в кожному експерименті. Спектральна пірометрія застосовується в галузі фізики високих тисків [2], горіння та вибуху [3], газорозрядної плазми [4], нанотехнологій [5], технологій лазерної обробки матеріалів [6].

2.4. Види пірометрів та їх вимірювальні характеристики

Залежно від функціоналу розрізняють кілька типів пристроїв. За основним принципом дії прилади поділяють на:

• ***оптичні*** – працюють у спектрі видимого світла та ІЧ-випромінювання. Вони поділяються на яскраві — порівнюють колір випромінювання об'єкта та вбудованої нитки та колірні (мультиспектральні) – порівнюють яскравість об'єкта в різних областях спектру;

• ***радіометри або інфрачервоні пірометри*** — застосовують радіаційний спосіб для інфрачервоних хвиль. Це пристрої повного випромінювання нагрітого тіла, яке включає видиме і невидиме випромінювання променів. Для точності вимірів у радіаційних пірометрах застосовують лазер [7].

Залежно від вимірюваного діапазону прилади ділять на: ***високотемпературні*** – від 400ºС і вище та ***низькотемпературні*** – підходять для вимірювання низьких температур від -50ºС.

Розрізняють такі властивості пірометрів:

- ***оптична роздільна здатність*** - це співвідношення між віддаленістю об'єкта і діаметром плями вимірювань. Визначається відношенням діаметра плями (кола) на поверхні, випромінювання з якого реєструється пірометром, до відстані до об'єкта. Цей показник визначає функціонал пристрою та його вартість. У деяких моделях передбачено налаштування температури - максимальної, мінімальної або середньої. На рис.1 зображено пірометр з оптичною роздільною здатністю 6:1.

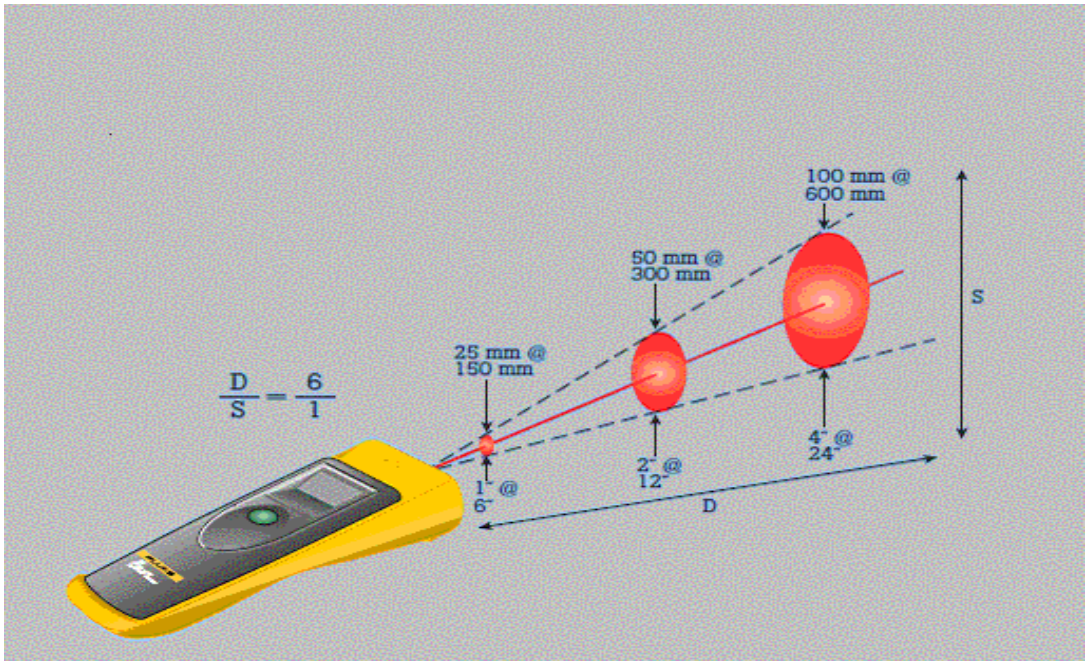


Рисунок 1. Пірометр з оптичною роздільною здатністю 6:1 (зображення з сайту компанії Fluke *"Company Overview of Fluke Corporation". Bloomberg. Retrieved May 11, 2016.*).

Завдяки наявності функції безперервного вимірювання температури, прилади можуть визначати місця теплового витоку та несправних електричних елементів. Пірометри безконтактні переміщають поверхнею і відстежують зміни температури;

- ***діапазон температур*** – мінімальна та максимальна позначка визначених значень. При виборі пристрою необхідно враховувати температуру об'єктів, які планується досліджувати. Побутові моделі розраховані на вимірювання від –50 до +500 ºС. Чим вищий діапазон, тим дорожчий пристрій;

- ***коефіцієнт випромінювання***. Визначає ступінь випромінювання інфрачервоного тепла поверхнею об’єкта. Коефіцієнт визначається як відношення енергії, що випромінюється даною поверхнею за певної температури, до енергії випромінювання абсолютно чорного тіла при тій же температурі. Залежить від матеріалу, тому важлива здатність пірометру регулювати цій параметр та вимірювати температури різних поверхонь з високою точністю;

- ***час відгуку*** — важливий параметр, якщо необхідно проводити багато вимірів або при швидких змінах температури. Професійні моделі мають швидкість відгуку 0,15 с, це дозволяє виконувати великий обсяг роботи в мінімальні терміни. Для побутових варіантів достатнім є час швидкодії τ = 1с;

- ***точність вимірювання***. Критично важлива характеристика, особливо у галузях, де вимірювання мають бути особливо точними. Зазвичай точність вимірювання вказується як плюс-мінус відсоток від показання або як абсолютне значення., наприклад: ±2°C або ±2% від виміряної температури;

- сучасні пірометри можуть бути оснащені функціями ***збереження та передачі даних***. Це дозволяє зберігати результати вимірювань для подальшого аналізу або передавати їх на інші пристрої;

- ***лазерний приціл***. Допомагає точно навести пірометр на об'єкт вимірювання, що корисно при вимірюванні температури важкодоступних об'єктів. Лазерний приціл дозволяє підвисити точність вимірювання шляхом зменшення похибки вимірювання;

- ***захисні характеристики*** приладу. Мається на увазі: захист від пилу та вологи, ударостійкість, міцний корпус. Такі характеристики забезпечують довговічність приладу та можливість його використання у важких умовах.

Розділ 3. Лабораторна робота «Визначення сталої Стефана – Больцмана за допомогою оптичного пірометра»

Мета роботи*:* познайомитись з будовою та принципом роботи оптичного пірометра, визначити за його допомогою сталу Стефана–Больцмана.

Прилади і матеріали*:* змонтоване на планшеті електричне коло, оптичний пірометр, кінолампа, лабораторне джерело живлення (ЛІП–1), реостат, вольтметр, амперметр.

В лабораторній роботі розглядається способ вимірювання температури нагрітого тіла за допомогою ***пірометра з ниткою, що зникає***. Цей метод, заснований на порівнянні яскравості нагрітого тіла з яскравістю чорного тіла в тому ж спектральному інтервалі, має найбільше технічне поширення.

Розглянемо основні принципи використання цього методу в даній лабораторній роботі. ***Яскравістю джерела світла*** B_φ називається відношення потоку променистої енергії $d\Phi$, надісланому в будь-якому напрямку φ одиницею поверхні цього джерела S всередину малого тілесного кута $d\Omega$, до величини цього тілесного кута (рисунок 2):

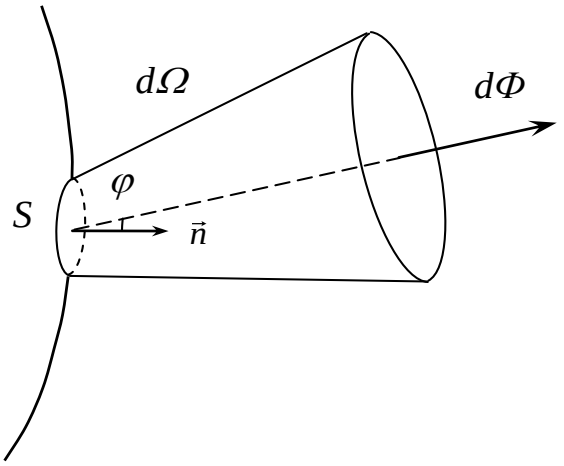


Рисунок 2. Схема для визначення яскравості джерела світла.

$$B_\varphi = \frac{d\Phi}{S\ \cos\varphi\ d\Omega} \qquad (3.1)$$

Припустимо, що маємо чорне тіло, нагріте до деякій температури, а на його фоні розташована нитка розпалу пірометричної лампи. Ми розглядаємо нитку і тіло через світлофільтр, що виділяє випромінювання певної довжини хвилі (зазвичай це буває випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 660$ нм) із спектрів обох об'єктів. Регулюючи струм розпалу в нитці лампи, ми можемо добитися того, що нитка зникне на тлі розжареного чорного тіла, тому перестає бути видимою. Це відбувається, коли яскравості чорного тіла і нитки для

використовуваної довжини світлової хвилі зрівняються. Знаходячи значення сили струму розпалу нитки за цих умов, а також вимірявши температуру чорного тіла яким-небудь іншим способом – за допомогою термометра опору, термопари і виконавши цю операцію при різних температурах, ми прокалібруємо таким чином в шкалі температур яскравість нитки залежно від струму напруження. Після цього нитку лампи можна застосовувати, у свою чергу, як термометр.

Допустимо, що нам треба виміряти температуру якого-небудь нагрітого тіла. Помістимо прокалібровану нитку на тлі цього тіла, і змінюючи в ній струм розпалу I, доб'ємося її зникання. Користуючись калібрувальним графіком, ми можемо знайти відповідну цьому струму температуру чорного тіла. Якщо випромінювання нашого тіла відрізняється від випромінювання чорного тіла, то знайдене значення температури потребує деякої поправки, оскільки воно відповідає не дійсній, а *яскравій температурі*. Під нею розуміється температура чорного тіла, яке для $\lambda = 660$ нм має ту ж саму яскравість, що і дане нам тіло за умов спостереження.

Як було вказано вище (див. розділ 2), яскрава температура тіла $T_{яскр}$ буде завжди нижча за його термодинамічну температуру *T*, оскільки, згідно закону Кірхгофа, будь-яке тіло випромінює за однієї і тієї ж температурі менше, ніж чорне тіло. Отже, довільне тіло, що має в даний момент однакову з чорним тілом яскравість (для певної довжини хвилі), має термодинамічну температуру вище за температуру чорного тіла, тобто вище за ту температуру яскравості, яка визначається за допомогою пірометра. Відмінність між яскравою та термодинамічною температурою може бути значною. Зв'язок між ними встановлюється співвідношенням:

$$T = T_{яскр} + \Delta T \tag{3.2}$$

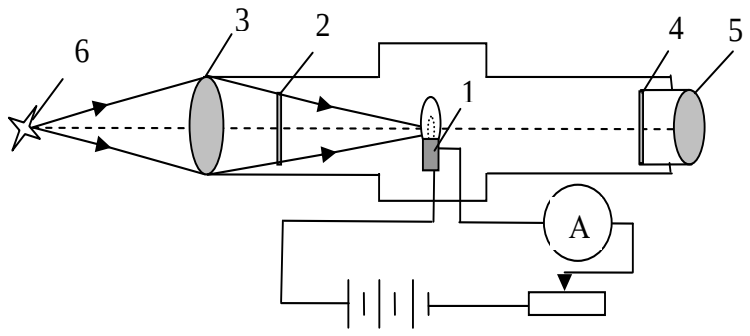
де

$$\Delta T = \alpha T_{яскр}^{2}. \tag{3.3}$$

Коефіцієнт пропорційності α залежить від природи випромінюючого тіла та визначається з досвіду. Зокрема, для вольфраму

$$\alpha = 4{,}2 \cdot 10^{-5}\, K^{-1}. \qquad (3.3)$$

Схема пірометра, описаного вище, представлена на рис. 3. Об’єктив пірометра *3* проектує зображення досліджуваного тіла в площину розташування нитки напруження пірометричної лампи (далі – кінолампа) *1*. Нитка напруження лампи має форму підкови. Нитка і зображення досліджуваного об'єкту, що надається за допомогою об'єктива, розглядаються спостерігачем через окуляр *5*. У цьому ж окулярі розташований червоний світлофільтр *4*, який використовується для світла певної довжини хвилі: $\lambda = 660$ нм. Цей світлофільтр може виводитися з поля зору обертанням рифленого кільця на окулярі пірометра для зручності фокусування об'єкту в білому світі. Окрім червоного світлофільтру, в пірометрі є ще один помаранчевий світлофільтр *2*, показаний на рисунку 3.



1 – еталонна лампочка;
2 – діафрагма; 3 – об’єктив;
4 – світлофільтр; 5 − окуляр;
6 − кінолампа.

Рисунок 3. Схема пірометра.

Він призначений для попереднього ослаблення яскравості досліджуваних тіл, температура яких перевищує *1400*°С, оскільки при таких температурах нитка лампи починає активно випаровуватися. При введеному захисному світлофільтрі за допомогою нашого пірометра можна вимірювати температуру тіл, нагрітих до *2000*°С, для чого пірометр забезпечений другою шкалою температур, проградуйованою відповідним чином. Описаний пірометр має різні

конструктивні втілення. Одне з них – пірометр конструкції Гартмана і Брауна – показаний на рисунку 4.

Рисунок 4. Пірометр конструкції Гартмана і Брауна

Опис установки

Лабораторна установка надана на рисунку 5. Установка складається з оптичного пірометра *1*, кінолампи *2*, амперметра *3*, вольтметра *4* та реостата *5*. Ці елементи з'єднанні в коло, електрична схема якого приведена на рисунку 3.5. Вмикання установки здійснюється тумблером Т.

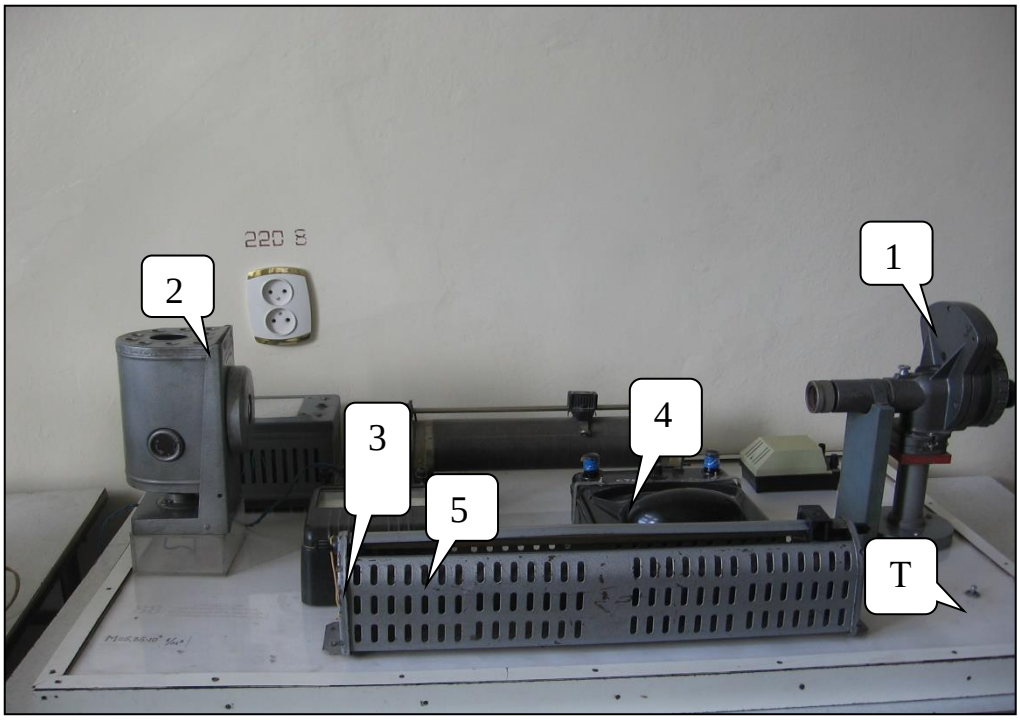


Рисунок 5. Лабораторна установка.

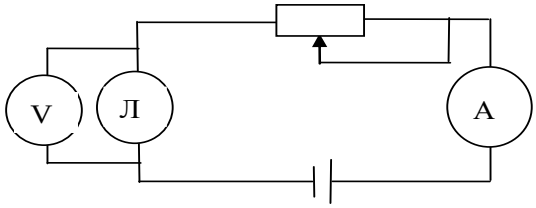


Рисунок 6. Електрична схема експериментальної установки.

За допомогою амперметра *А* та вольтметра *V* знаходять силу струму I та напругу U на джерелі світла – кінолампи *Л,* яка є досліджувальним тілом (рис. 6.).

Відлік температури за шкалою пірометра роблять тоді, коли яскравості нитки розжарення еталонної лампочки пірометра і поверхні досліджуваного тіла будуть однаковими (рис. 7).

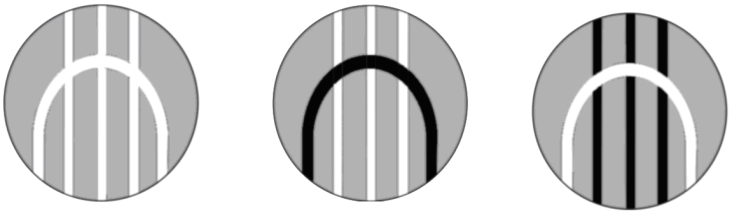


Рисунок 7. Зображення для порівняння яскравості та визначення температури.

Якщо підведена енергія витрачається тільки на випромінювання, то потужність струму дорівнює:

$$P = IU = \sigma(T^4 - T_0^4) \cdot S \qquad (3.4)$$

де T – температура спіралі лампи, T_0 – кімнатна температура,

S – площа поверхні досліджуваного тіла.

Той факт, що спіраль не є чорним тілом, враховується за допомогою використання коефіцієнта k. Підведена до лампи енергія випромінюється не повністю, тому (3.4) слід записати у вигляді:

$$K' \cdot IU = k\sigma S(T^4 - T_0^4) \qquad (3.5)$$

де K' – коефіцієнт, котрий показує, яка доля енергії їде на випромінювання. Коефіцієнти K', k та площу S можливо замінити єдиним множником *M*:

$$M = \frac{K'}{kS}, \qquad [M] = м^{-2}. \qquad (3.6)$$

В області температур ~ *1000* К T_0^4 складає приблизно 0,25% від T^4, тому їм можна знехтувати. Тоді з (3.5) та (3.6) отримуємо

$$M \cdot IU = \sigma T^4. \qquad (3.7)$$

З цього співвідношення можливо знайти коефіцієнт σ – сталу Стефана–Больцмана:

$$\sigma = \frac{MIU}{T^4} \qquad (3.8)$$

Порядок виконання роботи

1. Підготувати пірометр до роботи. Для цього:

- при вимкнутому живленні пірометра перевірити “0” стрілки пірометра, повернувши дисковий регулятор на пірометрі в крайнє ліве положення;
- перевести тумблер T у положення „увімкнути.”;
- встановити в пірометрі червоний світлофільтр.

2. Встановити за допомогою реостату силу струму в кінолампі $I = 1\text{A}$ та виміряти напругу U за допомогою вольтметра.

3. Регулятором пірометра встановити розжарення еталонної лампочки таким, щоб яскравість її нитки співпадала з яскравістю нитки кінолампи.

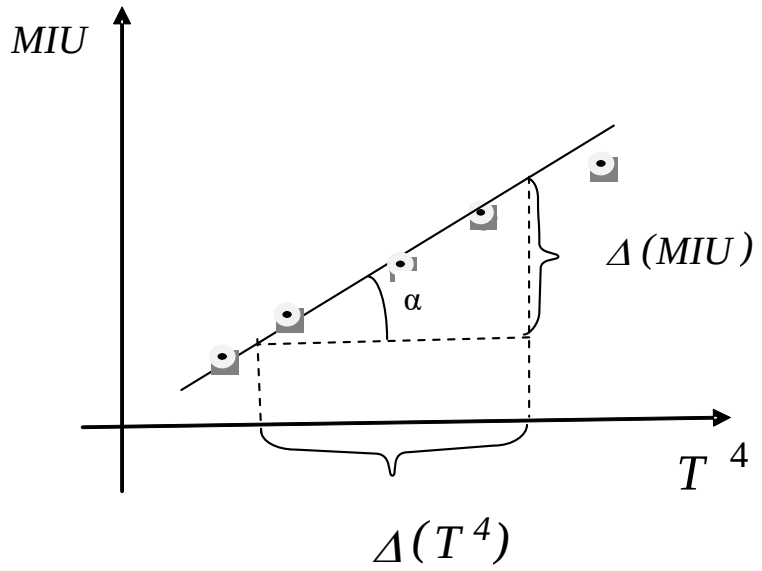


Рисунок 8. Загальний вигляд залежності $MIU = f(T^4)$

4. Знайти температуру t (в градусах Цельсія) по шкалі пірометра та перерахувати її значення в температуру Т (в градусах по шкалі Кельвіна).

5. Результати вимірювань і розрахунків записати в таблицю.

6. Повторити пункти 2-3 для різних значень сили струму.

7. За даними таблиці побудувати графік залежності добутку MIU від T^4: $MIU = f(T^4)$. Значення величини М вказано на установці:

$\text{М} = 1{,}22 \cdot 10^4 \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$.

8. За графіком знайти сталу Стефана–Больцмана як тангенс кута нахилу прямий до вісі T^4 (рисунок 3.7).

$$tg\,\alpha = \sigma = \frac{\Delta(M \cdot IU)}{\Delta(T^4)} \tag{3.9}$$

9. Розрахувати значення сталої Стефана-Больцмана для кожного з трьох дослідів за формулою:

$$\sigma = \frac{MIU}{T^4} \tag{3.10}$$

та знайти середнє значення шуканої величини.

10. Порівняти результати розрахунків σ графічним та аналітичним методом.

11. Розрахувати похибку вимірювань для аналітичного методу.

Додаток 1.

Приклад оформлення лабораторної роботи

1. На підставі отриманих результатів експерименту заповнюємо таблицю:

Таблиця 3.1. Результати експерименту.

№ з.п	Сила струму кінолампи I, А	Напруга на кінолампі U, В	Температура тіла		$MIU \times 10^4$, Вт× м$^{-2}$	Стала Стефана-Больцмана σ, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$
			Т, °С	T, К		
1	1,21	36	1500	1773	53,14	$5{,}38 \cdot 10^{-8}$
2	1,24	46	1570	1843	69,59	$6{,}03 \cdot 10^{-8}$
3	1,27	53	1690	1963	82,12	$5{,}53 \cdot 10^{-8}$

2. За даними таблиці будуємо графік залежності MIU(T^4) .

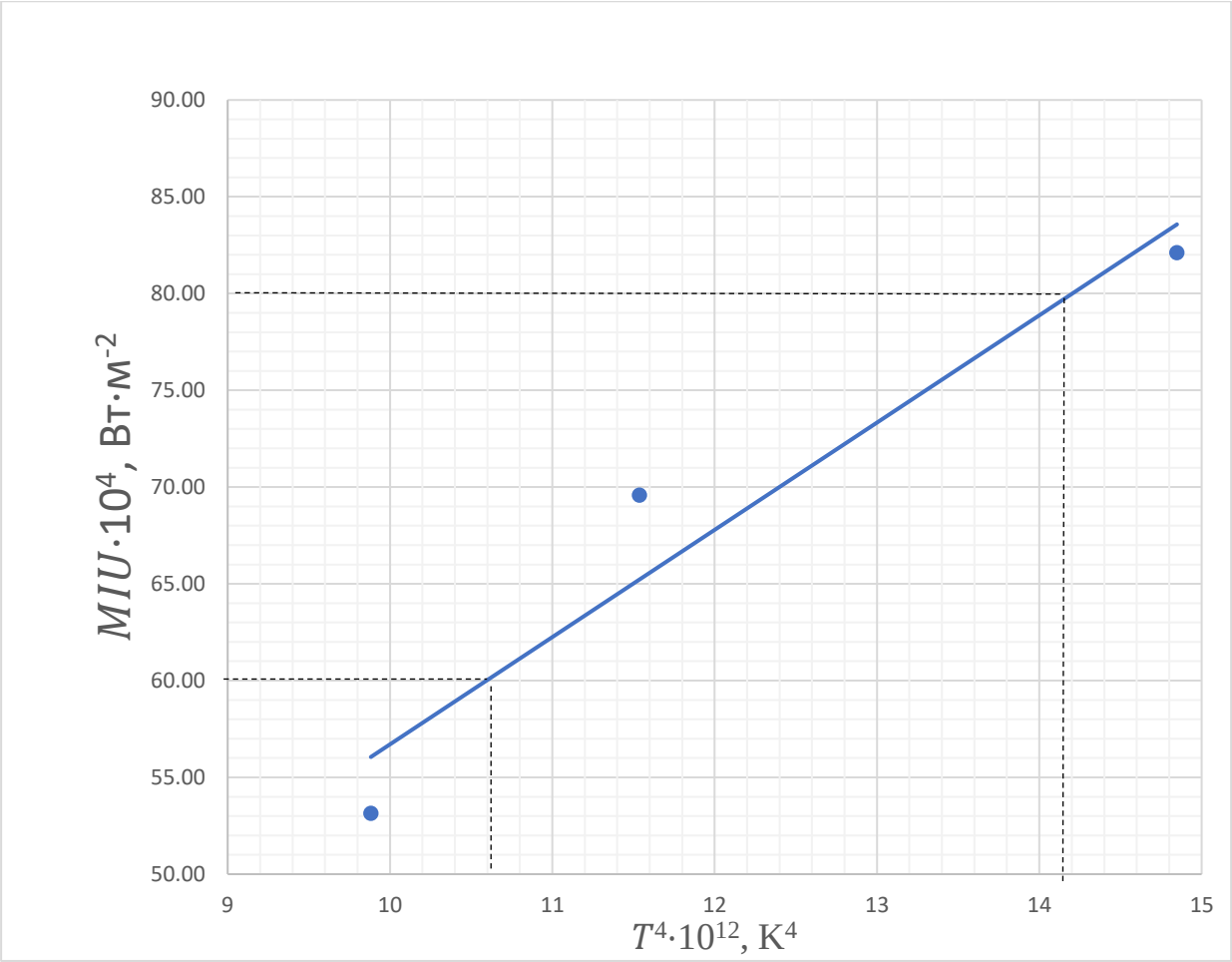


Рисунок 9. Графік залежності MIU(T^4)

3. Розраховуємо сталу Стефана–Больцмана двома методами – графічним та аналітичним.

3.1. На графіку (рис. 9.) обираємо ділянку, відповідно до якої знаходимо значення $\Delta(MIU)$ та $\Delta(T^4)$. Підставляємо у формулу (3.9) та знаходимо значення сталої Стефана–Больцмана:

$$\sigma = \frac{20 \cdot 10^4}{3{,}53 \cdot 10^{12}} = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}.$$

3.2. За результатами експериментів розраховуємо значення сталої Стефана–Больцмана, використовуючі формулу (3.10). Згідно з отриманими даними розраховуємо середнє значення сталої Стефана – Больцмана:

$$\sigma_{\text{сер}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

$$\sigma = 5{,}65 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}.$$

4. Бачимо, що результати, отримані аналітичним та графічним методами, добре узгоджуються.
5. Обчислюємо похибку вимірювань.

Робоча формула:

$$\sigma = \frac{MIU}{T^4},$$

Розрахункові дані:

$$M - const,$$

$$I_{\text{сер}} = 1{,}33\text{А}$$

$$U_{\text{сер}} = 50\text{В}$$

$$T_{\text{сер}} = 1860K$$

$$\Delta I = 0{,}05\ A; \Delta U = 0{,}05\ \text{В}; \Delta\text{Т} = 0{,}5\ \text{К}$$

Логарифмуємо: $ln\sigma = \ln(M) + \ln(I) + \ln(U) - 4\ln(T)$

Диференціюємо: $dln\sigma = d(\ln(M) + \ln(I) + \ln(U) - 4\ln(T))$

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = \frac{dM}{M} + \frac{dI}{I} + \frac{dU}{U} - 4\frac{dT}{T} = \frac{dM}{M} + \frac{dI}{I} + \frac{dU}{U} - 4\frac{dT}{T}$$

Оскільки $M = const$, то $\frac{dM}{M} = 0$. Враховуючі цій факт, та зробив заміну d на Δ і «-» на «+», отримуємо:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U} + 4\frac{\Delta T}{T}$$

Підставляємо дані:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{0{,}05}{1{,}33} + \frac{0{,}05}{50} + 4\frac{0{,}5}{1860} = 0{,}0397 \approx 0{,}04$$

Відносна похибка:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{\sigma} \cdot 100\%$$

$$\varepsilon \approx 4\%$$

Отже, відносна похибка становить **≈ 4%**.

Отже, основні результати дослідження та виконання цієї лабораторної роботи можно сформулювати таким чином:

- Підтверджено залежність енергетичної світності від температури випромінюючого тіла.
- Встановлено, що величина сталої Стефана – Больцмана, отримана як аналітичним, так і графічним методом, добре узгоджується з її теоретичним значенням (величина похибки < 10%).

Таким чином, оптичний пірометр, використаний у лабораторній роботі, показав високу точність вимірювань температури безконтактним методом і придатний для визначення температури у промислових застосуваннях.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи були отримані наступни результати.

1.Розглянути та проаналізовані фізичні основи методів оптичної пірометрії.

2.Проведено експериментальне визначення сталої σ Стефана–Больцмана з використанням оптичного пірометра. Розрахунки виконани двома способами – аналітичним та графічним. Результати добре узгоджуються з теоретичним значенням величини σ .

3.Отримані результати підтвердили можливість застосування оптичного пирометра для безконтактного вимірювання температури, що важливе для практичного застосування у фізиці теплового випромінювання, а також у промислових та наукових дослідженнях – наприклад, у процесі отримання кристалів у ростових установках розчин - розплавними методами (Чохральського, Кіропулоса).

Список використаних джерел.

1. Головін, С. Ю., & Іванов, Ю. Ф.. Фізичні основи пірометрії. Харків: ХНАДУ, 2008.
2. Основи метрології та вимірювання температури: навч. посібник / За ред. С. М. Шульги. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. — 232 с.
3. Tsai, H. L., & Fang, T. H. Temperature Measurement Using Optical Methods in Micro/Nano-scale Systems. Measurement Science and Technology, 16(4), 2005, R33–R48.
4. Пат. UA 127364 U, МПК G01J 5/00. Пристрій для безконтактного вимірювання температури / Сідляр О. В., Поліщук С. Ю. — заявл. 20.01.2018; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12.
5. https://simvolt.ua/suchasn-nfrachervon-prometri-vimryuvannya-temperaturi-bez-dotiku.html/
6. Сіренко, Ю. М. Неруйнівний контроль температури в металургії. — К.: Наукова думка, 2009. — 172 с.
7. Дідковський, О. М., Савчук, А. П. Основи оптичної пірометрії. — Вінниця: ВНТУ, 2015. — 135 с.