

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені І.І. МЕЧНИКОВА

Кафедра теплофізики

Методичні вказівки

«ОПТИЧНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУР»

до спецкурсів

«Теплопередача», «Газодинаміка горіння»

та спецпрактикуму

**«Високотемпературні процеси в дисперсних
системах»**

**О д е с а
2012**

УДК 536.3, 536.52

Методичні вказівки до спецкурсів «Теплопередача», «Газодинаміка горіння» та спецпрактикуму «Високотемпературні процеси в дисперсних системах». Оптичні методи вимірювання температур.

Автори:

В.В. Калінчак, доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри теплофізики;

С.Г. Орловська, кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри теплофізики;

Ф.Ф. Карімова, науковий співробітник науково-дослідної лабораторії №5.

Рецензенти:

Ю.Ф. Ваксман, доктор фізико-математичних наук, професор
С.М. Контуш, доктор фізико-математичних наук, професор

Затверджено до друку
Вченою радою фізичного факультету
ОНУ імені І.І. Мечникова.
Протокол № 1 від 10 вересня 2012 р.

© Калінчак В.В., Орловська С.Г., Карімова Ф.Ф., 2012

© Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, 2012

ЗМІСТ

Вступ.....	4
<i>Робота № 1.</i> Вимірювання радіаційної температури нагрітого тіла.....	6
<i>Робота № 2.</i> Вимірювання яскравісної температури нагрітого тіла.....	10
<i>Робота № 3.</i> Визначення розподілу температури по поверхні вольфрамової стрічки стандартної лампи	14
<i>Робота № 4.</i> Вимірювання температури полум'я методом обернення спектральної лінії	19
Додаток.....	23

ВСТУП

Як відомо, у базових галузях промисловості України (металургії, металообробці та машинобудуванні) широко використовуються енергоємні високотемпературні процеси: плавка металів, кисневе різання, лазерна і плазмова обробка поверхні металевих деталей та інші. Вказані технологічні процеси потребують ретельного дотримання рекомендованих температурних режимів. Тому існує постійний попит на пристрої та методики для безконтактного вимірювання високих температур.

Окрім того, застосування сучасних приймачів інфрачервоного випромінювання дозволяє вимірювати досить низькі температури (нижчі за 0°C), завдяки чому сфера застосування пірометрів значно розширилась. Інфрачервоні пірометри та тепловізори використовують для діагностування технічного стану енергетичного обладнання і електричних мереж, для пошуку недоліків теплоізоляції будинків з метою енергозбереження, а також в інших галузях. Таким чином, на сьогодні температурні вимірювання складають приблизно п'ятдесят відсотків від загальної кількості вимірювань фізичних величин у промисловості.

Відзначимо головні переваги безконтактних методів вимірювання температури:

1. Дуже широкий діапазон вимірюваних температур – від 250 К до 10 000 К і навіть вище.
2. Можливість визначення температури віддалених об'єктів (у тому числі зірок), або швидко рухомих тіл, таких як фрикційні іскри або палаючі частинки палива.
3. Висока точність вимірювань завдяки сильній залежності інтенсивності випромінювання від температури тіла.

Зазначимо, що суттєвим недоліком оптичних методів вимірювання температури є відсутність даних стосовно випромінювальної здатності реальних матеріалів в умовах експерименту.

Також необхідно підкреслити, що методи пірометрії є придатними тільки за умови теплового характеру випромінювання.

Класифікація пірометрів базується на принципі дії (радіаційні, яскравісні та пірометри спектрального відношення), робочій області спектру – оптичній або інфрачервоній, а також на відносній ширині робочого діапазону:

1. $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \ll 1$ – вузькосмугові (квазімонохроматичні) пірометри;

2. $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\max}} \sim 1$ – широкосмугові пірометри, або так звані пірометри

«повного» випромінювання;

3. Пірометри спектрального відношення, які використовують декілька вузьких інтервалів спектру.

Вибір типу пірометра диктується конкретним діагностичним завданням та вартістю устаткування. Наприклад, квазімонохроматичний короткохвильовий пірометр є найбільш придатним для високо-температурної діагностики, тому що при $\lambda \cdot T < 2.876 \cdot 10^{-2}$ м·К (область Віна) спектральна інтенсивність випромінювання надзвичайно швидко зростає з температурою, що забезпечує високу точність вимірювань. Пірометри повного випромінювання, що вимірюють так звану радіаційну температуру, є корисними для вимірювання відносно низьких температур.

В процесі виконання завдань з даної збірки ви маєте опанувати техніку вимірювання температури за допомогою радіаційного пірометра ТЕРА-50 (робота №1) та вузькосмугового прецизійного пірометра ЕОП-66 (робота №2). Також ви ознайомитесь з основами сучасної пірометрії зображення (робота №3) та методом обернення спектральної лінії для вимірювання температури полум'я (робота №4).

Для поглибленого освоєння теми слід прочитати рекомендовану літературу і відповісти на запитання до роботи.

РОБОТА № 1

ВИМІРЮВАННЯ РАДІАЦІЙНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ НАГРІТОГО ТІЛА

Мета роботи: ознайомитись з принципом дії радіаційного пірометра, засвоїти методику вимірювань. Визначити радіаційну температуру нитки лампи розжарення для різних значень сили струму, обчислити відповідні значення дійсної температури, побудувати графіки залежності радіаційної та дійсної температури від сили струму.

Об'єкт дослідження: вольфрамова стрічка лампи розжарювання.

Прилад, що призначено для вимірювання радіаційної температури, називається пірометром повного випромінювання або радіаційним пірометром.

Радіаційні пірометри використовують для вимірювання температури на підприємствах енергетики, в металургійній та машинобудівельній галузях, у наукових лабораторіях. В основі методу радіаційної пірометрії лежить закон Стефана-Больцмана, що пов'язує енергетичну світність тіла з його температурою:

$$F = \varepsilon(T) \cdot \sigma \cdot T^4 \quad , \quad (1)$$

де F – інтегральний потік теплового випромінювання, Вт/м²;

$\varepsilon(T)$ – інтегральний коефіцієнт випромінювальної здатності, $\varepsilon(T) \approx 0.16$ для вольфраму при температурі 1600 К;

σ – стала Стефана-Больцмана, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Вимірювання температури радіаційним пірометром базується на перетворенні енергії теплового випромінювання в електрорушійну силу (ЕРС). На рис.1 приведено схему приймача пірометра. Випромінювання нагрітого тіла фокусується за допомогою об'єктива на термоприймач, що складається із 10 хромель-копелевих термопар, які з'єднанні послідовно. Робочі (гарячі) спаї термопар мають вигляд стрілок і звернені до центру, створюючи активну ділянку, на яку проектується зображення нагрітого тіла. Виникаюча при цьому ЕРС реєструється цифровим мілівольтметром. Пірометр проградуєвано по чорному випромінювачу (градуєвальна таблиця додається до паспорту приладу).

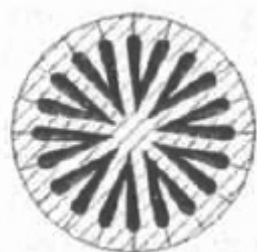


Рис. 1. Термобатарей телескопу ТЕРА-50 .

За допомогою радіаційного пірометра можна вимірювати дійсну температуру тільки чорного випромінювача. Для реального тіла ми безпосередньо одержимо значення так званої *радіаційної температури*.

Радіаційною температурою T_{rad} випромінюючого тіла S називають умовну температуру абсолютно чорного тіла T_{bb} (black body), при якій його інтегральна інтенсивність випромінювання F_{bb} дорівнює інтегральній інтенсивності випромінювання тіла F_s .

Якщо для поверхні даного випромінювача відомо інтегральний коефіцієнт випромінювальної здатності $\varepsilon(T)$, то ми можемо розрахувати дійсну температуру T_r . За визначенням ми маємо:

$$F_s = F_{bb} \quad \text{або} \quad \varepsilon(T) \cdot \sigma \cdot T_r^4 = \sigma \cdot T_{bb}^4$$

Таким чином, радіаційна температура тіла $T_{rad} = T_{bb}$. Звідси випливає вираз для дійсної температури реального випромінювача:

$$T_r = \frac{T_{rad}}{\sqrt[4]{\varepsilon}} \quad (2)$$

Оскільки для реального тіла $\varepsilon(T) < 1$, його радіаційна температура завжди нижча за дійсну: $T_{rad} < T_r$.

Різниця між дійсною температурою тіла і його радіаційною температурою складає систематичну похибку вимірювань радіаційним пірометром:

$$\Delta T = T_r - T_{rad} = T_{rad} \left(1 - \frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon}}\right) \quad (3)$$

З формули (3) випливає, що систематична похибка різко зростає з температурою і може досягати декілька сотень градусів.

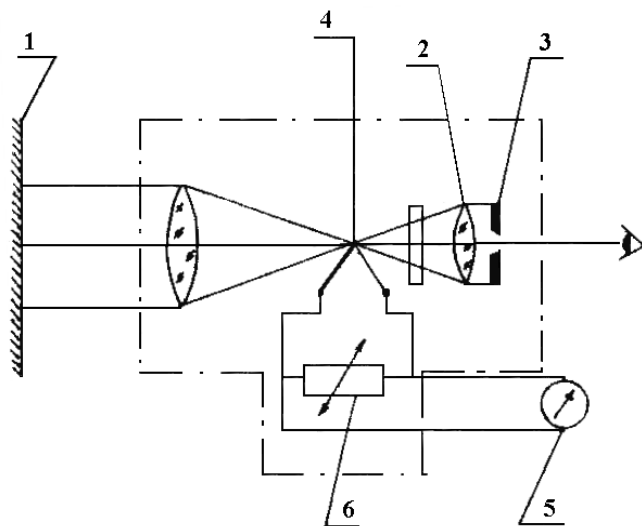


Рис. 2. Схема радіаційного пірометра: 1 – об'єкт дослідження; 2, 3 – окуляр; 4 – приймач випромінювання; 5 – мілівольтметр; 6 – реостат.

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомтесь зі схемою установки, перевірте електричні з'єднання (Рис.2).
2. Включіть мілівольтметр і дайте йому прогрітись протягом 10 хвилин.
3. Сфокусуйте зображення нитки розжарювання, пересуваючи телескоп пірометру. Наведення телескопу проводиться таким чином, щоб видимі через окуляр пелюстки термобатарей були повністю перекриті зображенням випромінювача. При цьому показник візування $\frac{d}{L} \geq \frac{1}{20}$ (d – лінійний розмір випромінювача, L – відстань від випромінювача до телескопу).
4. Встановіть за допомогою ЛАТРу значення струму крізь лампу, виконайте три виміри сигналу пірометру за допомогою мілівольтметра та знайдіть середню величину \bar{U} . Визначіть за градууювальним графіком відповідне значення радіаційної температури t_{rad} (°C). Перейдіть від градусів Цельсію до шкали Кельвіна та розрахуйте значення дійсної температури згідно формули (2). Отримані результати занесіть до таблиці.

Таблиця

№ вим.	I , А Струм лампи	\bar{U} , мВ	t_{rad} , °C	T_{rad} , К	T_r , К
1					
2					
3					

5. Побудуйте графіки залежностей $T_{rad}(I)$ і $T_r(I)$, а також графік $\Delta T(T_r)$.
6. Оцініть похибку вимірювання струму і температури та нанесіть на графік відповідні відхилення.

Сумарна похибка вимірювання температури пірометром складається з інструментальної та методичної. Величина інструментальної похибки вимірювального приладу залежить від його класу [2]. Інструментальна похибка комплекту радіаційного пірометру складається з допустимої похибки телескопу та допустимої похибки вимірювального приладу. Наприклад, ми використовуємо мілівольтметр класу 1.5. Телескоп ТЕРА (гр.3) дає сигнал 6.09 мВ на вході мілівольтметра при температурі 1200°C і сигнал 52.02 мВ при температурі 2000°C. Таким чином, діапазону шкали мілівольтметра відповідає різниця вхідного сигналу 45.93 мВ. З врахуванням класу приладу маємо, що допустима основна похибка дорівнює ± 0.69 мВ, що відповідає $\pm 27^\circ\text{C}$ на початку шкали (1200°C) та $\pm 7^\circ\text{C}$ в її кінці (2000°C). Допустима основна похибка телескопу є досить великою, тому не має сенсу застосування з ним вимірювального приладу високого класу.

Методична похибка вимірювання температури радіаційним пірометром обумовлена наступними чинниками:

1. Значення коефіцієнта випромінювальної здатності тіла $\varepsilon(T)$ залежить від температури та стану поверхні та може змінюватись з часом внаслідок утворення оксидної плівки та інших процесів. Звичайно для розрахунків дійсної температури використовують табличне значення $\varepsilon(T)$, що може привести до значної похибки.
2. Показник візування може бути менше номінального значення (тобто зображення об'єкту дослідження не закриває повністю поле зору приладу), внаслідок чого виміряне значення температури буде занижено.
3. Випромінювання об'єкту частково поглинається у повітрі парами води, вуглекислим газом і частинками пилу.
4. Прилад може нагріватись в процесі вимірювання.

Однак, найбільш суттєво впливає на методичну похибку вимірювань відхилення коефіцієнту випромінювальної здатності від табличного значення. Тому зробимо відповідну оцінку. Логарифмування та диференціювання рівняння (2) дає наступний вираз для відносної похибки визначення температури δT внаслідок відхилення величини $\varepsilon(T)$:

$$\delta T = \frac{\Delta T}{T} = -\frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta \varepsilon(T)}{\varepsilon(T)}. \quad (3)$$

Згідно формули (3) відносна похибка визначення дійсної температури надмірно велика при $\varepsilon(T) \leq 0.1$, тобто для неокислених металів. Тому застосування радіаційного пірометра може бути рекомендовано для неметалевих тіл, або при наявності на поверхні металів окисленого шару.

Розрахуйте $\frac{\Delta T}{T}$ для $\varepsilon = 0.16$ та величин $\Delta \varepsilon$ від 0.01 до 0.5, побудуйте графік залежності $\delta T = f(\Delta \varepsilon)$. Зробіть висновки.

Контрольні запитання:

1. Яку температуру називають радіаційною? Знайти її зв'язок з дійсною температурою нагрітого тіла.
2. Який закон лежить в основі методу радіаційної пірометрії? Як відбувається вимірювання температури радіаційним пірометром?
3. Вказати діапазон вимірювання температур і робочий інтервал довжин хвиль радіаційного пірометра.
4. Від чого залежить значення інтегрального коефіцієнта випромінювальної здатності? Якій величині він дорівнює для вольфраму?
5. Наведіть приклади тіл, близьких за випромінювальними властивостями до абсолютно чорного тіла.
6. Чому газорозрядні лампи є економнішими, ніж лампи розжарювання?

Література

1. А.Г. Сосновский, Н.И. Столярова. Измерение температур. Учебное пособие. Москва – 1970. – С. 140-141.
2. А.Н. Гордов. Основы пирометрии. Металлургия.– 1971. – С. 403.

РОБОТА № 2

ВИМІРЮВАННЯ ЯСКРАВИСНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ НАГРІТОГО ТІЛА

Мета роботи: вивчити принцип дії яскравісного пірометра ЕОП-66, овоїти методику вимірювань, визначити яскравісну температуру вольфрамової нитки лампи розжарювання для різних значень сили струму, обчислити значення дійсної температури, побудувати графіки залежності $T_r(I)$, $T_b(I)$.

Об'єкт дослідження: вольфрамова нитка лампи розжарювання.

Яскравісною температурою випромінюючого тіла називають умовну температуру абсолютно чорного тіла, при якій його спектральна інтенсивність випромінювання дорівнює спектральній інтенсивності випромінювання досліджуваного тіла.

Яскравісні візуальні пірометри широко застосовуються для вимірювання температур вище за 1000 К на виробництві та в дослідних лабораторіях. Ці прилади вимірюють яскравісну температуру світних об'єктів. В основі яскравісної пірометрії лежить формула Віна:

$$I(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right), \quad (1)$$

де $I(\lambda, T)$ – спектральна інтенсивність випромінювання тіла, Вт/м³;

$\varepsilon(\lambda, T)$ – спектральний коефіцієнт випромінювальної здатності;

C_1 – перша константа випромінювання, $C_1 = 3.7418 \cdot 10^{-16}$ Вт·м²;

C_2 – друга константа випромінювання, $C_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2}$ м·К.

Похибка наближення Віна не перевищує 1% за умовою $\lambda \cdot T < 2.898 \cdot 10^{-2}$ м·К, тобто для лівої частини графіку розподілу Планка.

Із визначення яскравісної температури і формули Віна можна отримати формулу, яка пов'язує дійсну та яскравісну температуру випромінювача:

$$\frac{1}{T_r} = \frac{1}{T_b} + \frac{\lambda}{C_2} \cdot \ln \varepsilon(\lambda, T). \quad (2)$$

Принцип дії яскравісного пірометра засновано на порівнянні квазімонохроматичної інтенсивності випромінювання нагрітого тіла з яскравістю пірометричної лампи, градуйованої по чорному випромінювачу. Для виміру температури твердих і рідких тіл в діапазоні від 1000 К до 6000 К використовують яскравісні пірометри зі зникаючої ниткою типу ЕОП-66, «Промінь», «Смотріч».

На рисунку1 приведено принципову схему пірометра. Зображення джерела випромінювання, температуру якого необхідно виміряти за допомогою телескопічного об'єктива, проектується в площину нитки розжарення пірометричної лампи. Спостерігач крізь окуляр розглядає нитку на фоні зображення дже-

рела випромінювання. Яскравість випромінювання нитки пірометричної лампи можна варіювати, змінюючи величину струму живлення. Якщо яскравості об'єкту дослідження і нитки розжарення пірометричної лампи рівні, їх зображення зливаються, у цей момент їх яскравісні температури також є рівними. Температуру об'єкту визначаємо за допомогою градуовальних таблиць залежності яскравісної температури пірометричної лампи від величини струму розжарення. Відзначимо, що не можна допускати перегрівання нитки розжарювання пірометричної лампи до температури, вищої за 1500 К (що відповідає струму крізь лампу 0.45 А). При перегріванні лампи її випромінювальні характеристики можуть змінитись. Використання сірих та кольорових світлофільтрів дозволяє розширити діапазон вимірювання температури без перегріву лампи порівняння.

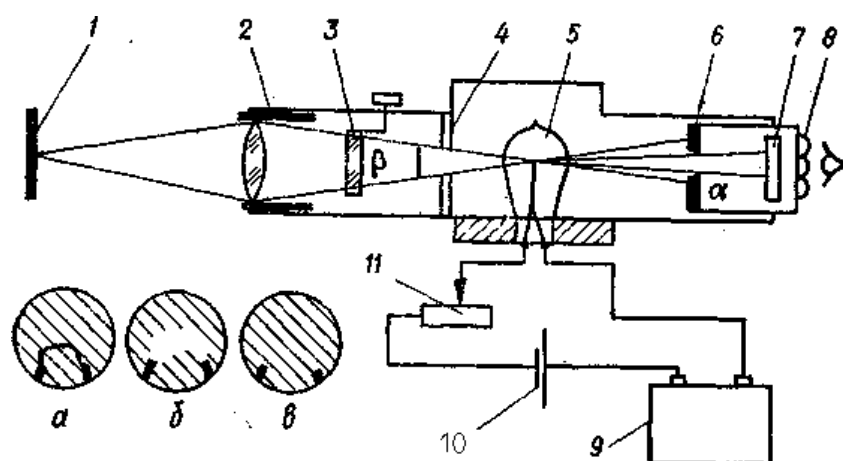


Рис. 1. Схема яскравісного пірометра: 1 – випромінювач; 2 – лінза об'єктиву; 3 – поглинаюче скло; 4,6 – діафрагми; 5 – пірометрична лампа; 7 – світлофільтр; 8 – окуляр; 9- міліамперметр; 10 – джерело струму; 11 – реостат; а, б, в — зображення нитки розжарення на фоні об'єкту відповідно при різних співвідношеннях температури нитки та об'єкту.

УВАГА!

- I. Струм крізь вольфрамову лампу та пірометричну лампу збільшуйте поступово від нуля до потрібного значення.
- II. Після того як встановили чергове значення струму розжарення лампи, необхідно витримати 5 хвилин для досягнення нового стаціонарного стану.
- III. Значення сили струму крізь лампу пірометра не повинно перевищувати 0.45 А.

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомтесь з оптичною та електричною схемами установки.
2. Включіть блок живлення пірометра і плавно підвищуйте струм в ланцюзі пірометричної лампи до появи видимого світіння нитки розжарення.
3. Пересуваючи окуляр, отримайте різке зображення нитки.
4. Подайте напругу живлення на лампу розжарення та повільно збільшуйте струм I , від нуля до 9А.

5. Переміщуючи тубус об'єктиву, отримайте чітке зображення тіла розжарення вольфрамової лампи. Треба добитись поєднання центральної частини нитки пірометричної лампи та області візування вольфрамової нитки.
6. Регулюйте струм крізь пірометричну лампу обертанням кільця реостата, поки зображення нитки не зіллється із зображенням стрічки.
7. Запишіть значення струму пірометричної лампи I_p .
8. Повторіть пункти 6-7 мінімум чотири рази: до моменту зрівнювання яскравостей нитки пірометричної лампи та лампи розжарювання потрібно наблизитись поперемінно з боку більшої яскравості нитки або меншої її яскравості по відношенню до яскравості об'єкту.
9. Знайдіть середнє значення величини струму пірометричної лампи \bar{I}_p та визначіть за допомогою градуювальної таблиці відповідне значення яскравісної температури t_b , °С.
10. Збільшуючи струм живлення лампи розжарювання до 14 А з кроком 0.5 А, виконайте вимір для кожного значення сили струму.
11. Розрахуйте значення дійсної температури згідно формули (2). Коефіцієнти монохроматичної випромінювальної здатності вольфраму $\varepsilon(\lambda, T)$ приведено в таблиці (див. Додаток).
10. Побудуйте графіки залежностей дійсної та яскравісної температури лампи розжарення від струму живлення $T = T(I_l)$.
11. Оцініть похибку вимірювання температури і сили струму, вкажіть їх на графіку $T = T(I_l)$.

Таблиця

№ вимір.	I_l , А струм лампи	Номер лампи, Номер обійми	\bar{I}_p , А струм піром. лампи	t_b , С	T_b , К	T_r , К
1	9					
2	9.5					
3	10					

Похибки вимірювання температури яскравісним пірометром включають інструментальні та методичні.

Інструментальні похибки - це похибки і варіації показників пірометру в різних точках шкали; похибки внаслідок зміни градуйованої характеристики пірометричної лампи, а також внаслідок зміни оптичних характеристик фільтрів. Сумарна інструментальна похибка не може перевищувати допустимої основної

похибки для приладу першого класу, а саме: 10 К при температурі 1000 К та 7 К при температурі 1700 К.

Методична похибка є наслідком відсутності даних відносно коефіцієнту випромінювальної здатності; поглинання випромінювання у проміжному середовищі; помилок спостерігача при зрівнюванні яскравостей об'єкту та нитки пірометричної лампи.

Найбільш суттєвим є перший чинник, а саме відхилення використовуваного значення $\varepsilon(\lambda, T)$ від його дійсної величини. Тому необхідно оцінити саме цю похибку. Позначимо: $\varepsilon^0(\lambda, T)$ – таблична величина коефіцієнту випромінювальної здатності, а $\varepsilon^r(\lambda, T)$ – його реальне значення. Розрахуємо T_r^0 – значення дійсної температури, яке відповідає табличній величині $\varepsilon^0(\lambda, T)$, а T_r^r – істинне значення дійсної температури, що відповідає реальному значенню коефіцієнта випромінювальної здатності $\varepsilon^r(\lambda, T)$.

Тоді ми маємо:

$$\frac{1}{T_r^0} = \frac{1}{T_b} + \frac{\lambda}{C_2} \cdot \ln \varepsilon^0(\lambda, T),$$

$$\frac{1}{T_r^r} = \frac{1}{T_b} + \frac{\lambda}{C_2} \cdot \ln \varepsilon^r(\lambda, T).$$

Віднімаємо з першого рівняння друге і отримуємо наступний вираз для відносної похибки визначення температури:

$$\delta T = \frac{\Delta T}{T} \approx T \cdot \frac{\lambda}{C_2} \cdot \ln \frac{\varepsilon^0(\lambda, T)}{\varepsilon^r(\lambda, T)} \quad (4)$$

За умови $\varepsilon^r - \varepsilon^0 \ll \varepsilon^r$ вираз (4) можна спростити до більш зручного вигляду:

$$\delta T = T \cdot \frac{\lambda}{C_2} \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Завдання. Розрахуйте значення відносної похибки δT в залежності від температури T , вважаючи $\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = 0.1$. Побудуйте графік $\delta T = f(T)$ для $1000 \text{ К} \leq T \leq 2000 \text{ К}$.

Зробіть висновки.

Контрольні запитання:

1. Сформулюйте закон Віна. Вкажіть область його застосування.
2. Яка температура називається яскравісною? Знайдіть зв'язок яскравісної температури з дійсною температурою тіла.
3. У чому полягає принцип дії яскравісного пірометра?
4. Вказати робочий діапазон довжин хвиль та межі вимірювання температури для пірометра ЕОП-66. Які фізичні фактори обмежують діапазон виміру температури і чим обумовлений спектральний діапазон пірометра?
5. Яким чином забезпечується достатньо широкий діапазон вимірювання температур (від 1000 К до 6000 К) пірометром ЕОП-66 ?
6. Вкажіть чинники, які впливають на точність вимірювання температури яскравісним пірометром?
7. В якому випадку яскравісна температура тіла дорівнює його дійсній температурі?

8. Виведіть формулу (2) для розрахунку дійсної температури з формули Віна (1) та обґрунтуйте вживання наближення Віна в цій роботі.
9. Яке тіло називається «сірим»? Чи можна розглядати вольфрамову нитку як сірий випромінювач?

Література

1. Температурные измерения. Справочник/Геращенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К. и др.– Киев: Наукова думка, 1989. – С. 606.
2. Ваксман Ю.Ф. Оптика // Одеса: Астропринт.–2001.–320с.

РОБОТА № 3

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ПО ПОВЕРХНІ ВОЛЬФРАМОВОЇ СТРІЧКИ СТАНДАРТНОЇ ЛАМПИ

Мета роботи: ознайомитись з основами пірометрії зображення, опрацювати методи комп'ютерної обробки цифрових зображень. За допомогою оптико-цифрового методу визначити розподіл яскравісної температури вздовж стрічки розжарювання стандартної лампи СИ 10-300 при кількох значеннях сили струму; знайти відповідні значення дійсної температури; проаналізувати роль теплообміну випромінюванням у загальному енергетичному балансі лампи.

В останнє десятиріччя значно поширилось застосування матричних приймачів випромінювання у діагностиці високотемпературних процесів. Прилади із зарядовим зв'язком – ПЗЗ (CCD) матриці створюють унікальні можливості для діагностики завдяки тому, що вони складаються з великої кількості окремих елементів (10 Мб і більше) – пікселів. Застосування матриць забезпечує високу часову та просторову роздільну здатність вимірювань, дає можливість отримання великих масивів даних.

ПЗЗ-матриці мають багато переваг в порівнянні з традиційними приймачами, а саме: високу чутливість, лінійність відгуку, великий робочий діапазон спектру (від 10 нм до 1100 нм), високу стабільність характеристик.

Певним недоліком є значний рівень теплових шумів, але шляхом охолодження матриці їх рівень можна суттєво зменшити.

Завдяки впровадженню матричних приймачів випромінювання виник перспективний напрямок діагностики – пірометрія зображення (imaging pyrometry), яка базується на обробці комп'ютерних зображень і перетворенні розподілу інтенсивності теплового випромінювання у температурне поле на поверхні випромінюючого тіла. Як відомо, раніше вимірювали локальну температуру (пірометр із зникаючої ниткою), або її значення, усереднене по зоні візування (радіаційний пірометр). Знання розподілу температури по поверхні дозволяє значно підвищити точність розрахунків тепловтрат випромінюванням.

У процесі виконання даної роботи ви ознайомитесь з основами пірометрії зображення на прикладі цифрового методу отримання та обробки зображення з використанням методу яскравісної пірометрії.

Об'єкт дослідження: розжарена до світіння вольфрамова стрічка стандартного джерела випромінювання СИ10-300. Лінійні розміри: $d = 2.72$ мм та $L = 19.7$ мм.

Для визначення розподілу температури по поверхні розжареної стрічки ми застосуємо *метод відносної яскравісної пірометрії* [1]. Він базується на формулі Віна, яка пов'язує спектральну інтенсивність випромінювання з температурою та довжиною хвилі [2]:

$$I(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right), \quad (1)$$

де $I(\lambda, T)$ – спектральна інтенсивність випромінювання тіла, Вт/м³;

$\varepsilon(\lambda, T)$ – спектральний коефіцієнт випромінювальної здатності;

C_1 – перша константа випромінювання, $C_1 = 3.7414$ Вт·м²;

C_2 – друга константа випромінювання, $C_2 = 1.438 \cdot 10^{-2}$ м·К;

Формула Віна справедлива за умовою $\lambda \cdot T < 2.876 \cdot 10^{-2}$ м·К, а саме для лівої гілки на графіку розподілу Планка.

Із формули Віна (1) з врахуванням лінійності відгуку ПЗЗ матриці було отримано вираз для перетворення розподілу інтенсивності випромінювання по поверхні у розподіл яскравісної температури:

$$\frac{1}{T_b(x, y)} = \frac{1}{T_0} + \frac{\lambda}{C_2} \cdot \ln\left[\frac{S_0}{S(x, y)}\right], \quad (2) \quad \text{де}$$

$T_b(x, y)$ – яскравісна температура у довільній точці поверхні стрічки, К;

T_0 – яскравісна температура у реперній точці (x_0, y_0) нагрітого тіла, виміряна за допомогою пірометра із зникаючою ниткою, К;

C_2 – друга константа випромінювання, $C_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2}$ м·К;

S_0 – сигнал матриці у реперній точці зображення, відн.од.

$S(x, y)$ – сигнал матриці в довільній точці (x, y) зображення нагрітого тіла, відн.од.

λ – робоча довжина хвилі світлофільтру, м.

Опис експериментальної установки.

На рисунку 1 наведено схему установки. Живлення стандартної лампи СИ10-300 (1) здійснюється від стабілізованого джерела постійного струму (4), величина якого контролюється амперметром (А). Яскравісну температуру у реперній точці стрічки розжарювання вимірюють за допомогою пірометра із зникаючої ниткою ЕОП-66. Нитка розжарювання пірометричної лампи (2) служить джерелом порівняння. Опір у ланцюзі живлення пірометричної лампи змінюють за допомогою реостату (3), поки зображення нитки не зникне на фоні зображення стрічки лампи СИ10-300. У цей момент яскравісна температура області візування поверхні стрічки дорівнює яскравісній температурі випромінюючої нитки пірометричної лампи. Останню визначаємо із калібрувальної таблиці пірометра.

Цифрова камера (6) розміщена на штативі. Фотографування стрічки розжарювання здійснюється крізь світлофільтр (5).

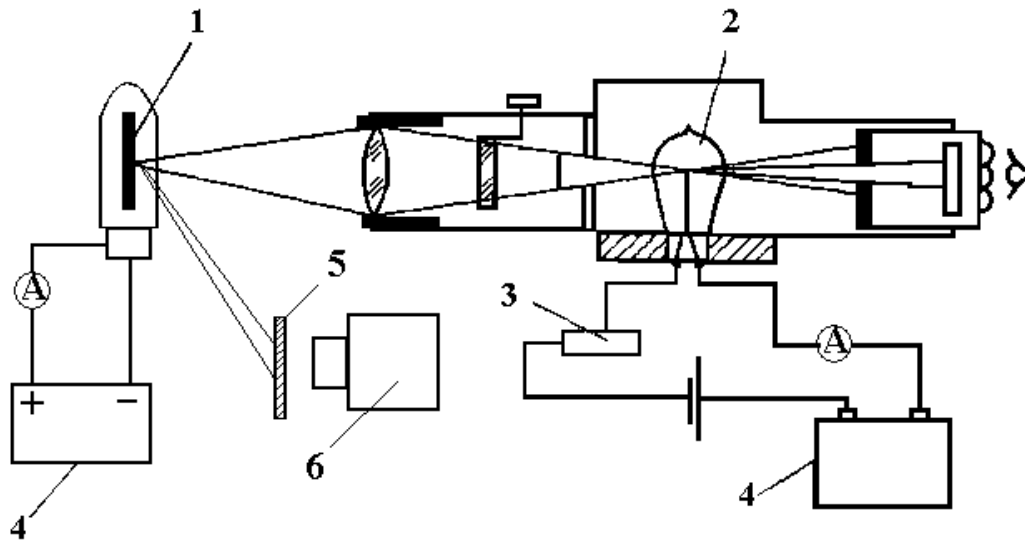


Рис. 1. Схема пристрою: 1 – лампа СИ10-300; 2 – пірометрична лампа; 3 – реостат; 4 – джерело живлення; 5 – світлофільтр; 6 – цифрова камера.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомтесь з оптичною та електричною схемами установки.
2. Включіть блок живлення пірометра і поступово збільшуйте струм в ланцюзі пірометричної лампи до появи видимого світіння нитки розжарювання.
3. Пересуваючи окуляр пірометра, отримайте чітке зображення нитки розжарювання пірометричної лампи.
4. Подайте напругу живлення на лампу СИ 10-300 та повільно збільшуйте струм від нуля до 9А.
5. Переміщуючи тубус об'єктиву, отримайте різке зображення стрічки розжарення лампи. Необхідно добитись поєднання центральної частини нитки лампи та області візування стрічки розжарювання (на рівні горизонтального покажчика).
6. Регулюйте струм крізь пірометричну лампу обертанням кільця реостата, поки зображення волоска не зіллється з зображенням стрічки.
7. Запишіть в таблицю величину струму пірометричної лампи $I_{\text{пір}}$, визначіть за допомогою градуовальної таблиці відповідне значення яскравісної температури t_b , °С та переведіть в градуси Кельвіна.
8. Встановіть цифрову камеру на відстані 15 см від віконця лампи СИ10-300 та сфотографуйте стрічку розжарення цифровою камерою крізь червоний світлофільтр при декількох значеннях часу експозиції. Збільшуючи величину струму живлення лампи до 10 А, виконуйте пункти 6-8.

Таблиця

№ вимір.	$I_{\text{си}}, \text{A}$	$I_{\text{пір}}, \text{A}$	$t_b, ^\circ\text{C}$	T_b, K
1	9			
2	9.5			
3	10			

9. Поступово зменшуйте струм живлення лампи СИ10-300 та пірометричної лампи до нуля.
10. Виключіть живлення камери та перенесіть отримані зображення на комп'ютер.

Обробка зображень на комп'ютері.

В пакеті MatLab виконайте наступні операції:

1. Завантаження файлу
2. Кадрування зображення
3. Виділення червоного каналу
4. Зменшення шумів
5. Отримання розподілу інтенсивності вздовж стрічки
6. Розрахунок розподілу температури вздовж стрічки [3].

На малюнках 2а÷2с приведено послідовні етапи визначення розподілу яскравісної температури вздовж вольфрамової стрічки при силі струму 10.4 А. Реперній точці у центральній ділянці дротика відповідає яскравісна температура $T_b = 1203 \text{ K}$.

На рисунку 2а приведено зображення нагрітої вольфрамової стрічки, отримане за допомогою цифрової камери крізь інтерференційний фільтр ($\lambda=0.77 \text{ мкм}$). На рисунку 2b наведено розподіл сигналу червоного каналу ПЗЗ матриці (у відносних одиницях) вздовж стрічки, отриманий в результаті комп'ютерної обробки зображення. На рисунку 2с – розрахований розподіл яскравісної температури $T_b(x)$.

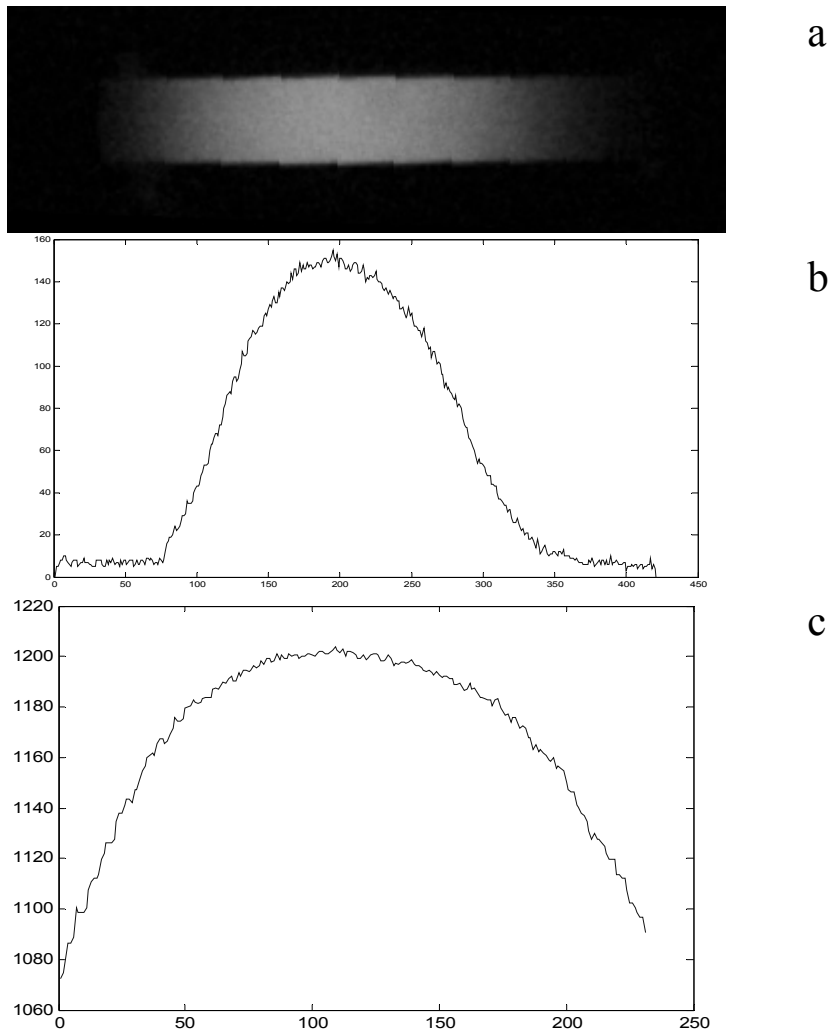


Рис. 2. Зображення стрічки розжарення ($I=10.4$ А) (а); розподіл інтенсивності випромінювання вздовж стрічки, відн.од. (b); розподіл яскравісної температури $T_b(x)$ (с).

Оцінка похибки визначення локального значення яскравісної температури.

Відносну похибку визначення яскравісної температури можна оцінити із застосуванням формули:

$$\frac{\delta T}{T} = \frac{\lambda \cdot T}{C_2} \cdot \frac{\delta S}{S}, \quad (7)$$

де δS – середньоквадратичне відхилення сигналу матриці, яке залежить від номінальної чутливості цифрової камери і температури матриці. В умовах нашого експерименту $\delta S \approx 5$. Для середини робочого інтервалу ($S_0 = 100$) відповідно маємо:

$$\frac{\delta S}{S} = 0.05$$

Оцініть похибку визначення температури згідно формули (7) для інтервалу температур від 1000 К до 1500 К.

Контрольні запитання

1. Виведіть формулу Віна із формули Планка. Для яких температур формула Віна є дійсною у видимому діапазоні спектру?
2. Чому цифрові камери витіснили плівкові?
3. Яким чином можна зменшити похибку визначення температури вказаним методом?
4. Для чого необхідно знати розподіл температури по поверхні розжареного тіла?
5. Які механізми теплообміну ви знаєте? Який механізм домінує при високих температурах і чому?

Література

1. Карімова Ф.Ф., Орловська С.Г. Патент України UA № 44416 від 12.10.2009 «Спосіб визначення локальної яскравісної температури в окремих точках нагрітого тіла та розподілу яскравісної температури по поверхні нагрітого тіла».
2. Температурные измерения. Справочник/Герашенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К. и др.– Киев: Наукова думка, 1989. – 704 с.
3. В. Дьяконов, И. Абраменкова. MatLab. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002.– 608 с.
4. Орловская С.Г., Карімова Ф.Ф., Калинин В.В., Шкоропато М.С., Зуй О.Н. Цифровая обработка изображений для диагностики высокотемпературных процессов / 13-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение. DSPA-2011», Москва, Россия, доклады, Выпуск: XIII-2, 2011 г. С.164-167.

РОБОТА № 4

ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОЛУМ'Я МЕТОДОМ ОБЕРНЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЛІНІЇ

Мета роботи: вивчити теорію методу та ознайомитись з експериментальною установкою, засвоїти методику вимірювання температури полум'я.

Об'єкт дослідження: полум'я спиртівки.

Метод обернення спектральної лінії широко використовується в лабораторних умовах для вимірювання температури прозорих полум'їв. Даний метод достатньо простий в реалізації і дозволяє вимірювати температуру полум'я в діапазоні 1700 ÷ 2800 К з достатньо високою точністю. Як правило, використо-

вують дублет натрію ($\lambda = 589; 589.6$ нм), тому що домішки сполук натрію завжди присутні у паливі. Якщо інтенсивність ліній мала, то треба ввести в склад палива або безпосередньо в полум'я солі натрію ($\text{NaCl}; \text{NaHCO}_3$). При зіставленні яскравості ліній із джерелом порівняння ці лінії здаються світлими або темними на фоні суцільного спектру, залежно від співвідношення температур полум'я та джерела порівняння. В основі даного методу лежить закон Кірхгофа і експоненціальна залежність інтенсивності випромінювання лінії від температури.

Введемо такі позначення: T_s – яскравісна температура лампи; T_f – дійсна температура полум'я; $I_s(\lambda, T_s)$ – спектральна яскравість джерела; $I_f(\lambda, T_f)$ – спектральна яскравість полум'я і $\alpha(\lambda, T)$ – коефіцієнт поглинання факелом випромінювання у вузькому інтервалі довжин хвиль, який включає дублет натрію. Інтенсивність лінії на виході монохроматору I_λ дорівнює сумі інтенсивностей випромінювання полум'я I_f і лампи I_s з урахуванням ослаблення випромінювання лампи у факелі:

$$I_\lambda = I_s(\lambda, T_s) \cdot (1 - \alpha) + I_f(\lambda, T_f). \quad (1)$$

Оскільки градієнт яскравості випромінювання в суцільному спектрі джерела значно нижчий, ніж у лінійчатому спектрі полум'я, то можна вважати, що яскравість суцільного спектра поблизу лінії дорівнює його яскравості при довжині хвилі спектральної лінії. Тоді умову рівностей цих яскравостей запишемо у вигляді:

$$I_s(\lambda, T_s) = I_s(\lambda, T_s) \cdot (1 - \alpha) + I_f(\lambda, T_f),$$

або

$$\alpha \cdot I_s(\lambda, T_s) = I_f(\lambda, T_f). \quad (2)$$

Випромінювання спектральної лінії є термічним, тому, згідно закону Кірхгофа, коефіцієнт випромінювальної здатності $\varepsilon(\lambda, T)$ дорівнює коефіцієнту поглинальної здатності $\alpha(\lambda, T)$:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) = I_f(\lambda, T_f) / I_0(\lambda, T), \quad (3)$$

де $I_0(\lambda, T)$ — спектральна яскравість абсолютно чорного тіла при тій же довжині хвилі і рівній температурі. Тоді замість (2) маємо:

$$I_s(\lambda, T_s) = I_0(\lambda, T). \quad (4)$$

Таким чином, в момент обернення спектральної лінії дійсна температура полум'я дорівнює яскравісній температурі джерела випромінювання S.

В кінцевому виразі (4) не фігурує коефіцієнт поглинання полум'я $\alpha(\lambda, T)$, тому при однорідному температурному полі факела спостерігається одночасне зникнення всього контуру лінії. Незалежність характеру зникнення спектральної лінії від коефіцієнту поглинання дозволяє зробити висновок, що метод обе-

рнення можна використати для вимірювання температур полум'я, яке містить довільну кількість збуджених атомів натрію, спектральні лінії якого використовуються для вимірювання. Однак, при дуже малій концентрації в полум'ї збуджених атомів Na інтенсивність спектральної лінії стає настільки малою, а похибка візуального або фотоелектричного порівняння яскравостей лінії і фону навпаки великими, що вони можуть призвести до значних похибок визначення температури.

Інтенсивність спектральних ліній атомів лужних металів визначається заселеністю електронних рівнів атомів. Тому у випадку відсутності термодинамічної рівноваги результати вимірювання температури полум'я методом обернення можуть відрізнитися від результатів вимірювання температури іншим методом. Відхилення від рівноваги може мати місце в газових розрядах, при інтенсивному протіканні хімічної реакції (у фронті полум'я), в надзвукових газових потоках. У полум'ї, що горить при атмосферному тиску, товщина фронту горіння не перевищує десятих часток міліметра, тому в основному об'ємі факела реалізується локальна термодинамічна рівновага і заселеність електронних рівнів атомів відповідає локальній температурі полум'я.

Опис експериментальної установки.

Принципова схема установки приводиться на рисунку 1.

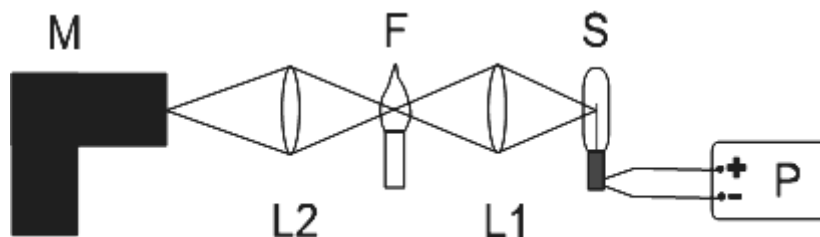


Рис. 1. Схема експериментальної установки для вимірювання температури полум'я методом обернення спектральних ліній: S – стандартна лампа; F – полум'я; L1, L2 – конденсори; M – монохроматор УМ-2; P – стабілізоване джерело живлення лампи.

Об'єктом дослідження є полум'я F спиртівки (в спирт додана невелика кількість хлориду натрію) (Рис.1). Вольфрамова лампа розжарювання S є джерелом порівняння. Живлення лампи здійснюється від стабілізованого джерела постійного струму P. Світловий потік від лампи фокусується за допомогою конденсора L1 на центральну частину факела. Потік, що пройшов крізь факел, фокусується другим конденсором L2 на вхідну щілину монохроматора M (УМ-2) сумісно з власним випромінюванням центральної зони факела. Регулюючи струм джерела живлення, можна спостерігати момент обернення (вирівнювання інтенсивностей лінії і фону) в окулярі монохроматора.

Основна похибка даного методу обумовлена значними градієнтами температури у факелі. Зовнішні зони факела, внаслідок інтенсивної тепловіддачі, виявляються холодними в порівнянні з фронтом реакції горіння. Метод обернення в цих умовах дає деяке усереднене по перерізу факела значення температури. Окрім того, в зовнішніх холодних областях відбувається поглинання випромінювання даної спектральної лінії, яка емітується атомами в гарячій зоні, що призводить до самообернення лінії. В результаті виміряне значення температури буде заниженим відносно дійсної температури полум'я.

При вимірюванні температури полум'я методом обернення спектральної лінії неоднорідність температурного поля полум'я призводить до виникнення похибки, обумовленої впливом присутніх частинок сажі. В однорідному температурному полі, згідно закону Кірхгофа, кількість променистої енергії, яка поглинається кожною частинкою, дорівнює кількості випроміненої енергії, і яскравість джерела, що візується скрізь факел, не змінюється. Внаслідок того, що у факелі існують зони з пониженою температурою, випромінювання гарячих зон полум'я доходить до спостерігача трохи ослабленим, і, значить, умови (1), що справедливі для всього факела, виявляються порушеними.

Таким чином, точність методу обернення, як правило, лімітується властивостями об'єкта дослідження, а саме наявністю значних температурних градієнтів.

Порядок виконання роботи

1. Вивчіть оптичну схему експериментальної установки.
2. Запаліть спиртівку і за допомогою конденсора L2 сфокусуйте зображення полум'я на вхідну щілину монохроматора.
3. Сфокусуйте окуляр монохроматора на жовтий дублет натрію.
4. Включіть джерело живлення еталонної лампи, поступово збільшуючи струм від нульового значення. Погасіть спиртівку на деякий час і за допомогою конденсора L1 наведіть зображення стрічки розжарювання лампи на центральну зону факелу. При цьому зображення стрічки також повинне бути сфокусоване на вхідну щілину монохроматора, а в окулярі - спостерігатись суцільний спектр.
5. Знову запаліть спиртівку і відрегулюйте висоту столика таким чином, щоб на щілину попадало зображення верхівки факела.
6. Спостерігаючи в окулярі монохроматора жовтий дублет натрію на фоні суцільного спектру, поступово збільшуйте струм розжарення лампи. В момент зникнення лінії на суцільному фоні запишіть показники амперметра.
7. Повторіть вимірювання 3 рази, знайдіть середнє значення сили струму.
8. За градуовальним графіком для еталонної лампи визначте її яскравісну температуру.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон Кірхгофа.
2. Які види спектрів ви знаєте?
3. Вказати переваги методу обернення спектральних ліній.
4. Чим обмежена точність визначення температури даним методом?
5. Для якого інтервалу температур є придатним цей метод ?

Література

1. Температурные измерения. Справочник/Герашенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К.– Киев: Наукова думка, 1989. – С. 606.
2. Гейдон А.Г., Вольфгард Х.Г. Пламя, его структура, излучение и температура. Пер. с англ. -М: Металлург, 1959. – 333 с.

ДОДАТОК

Вступ

Виробники пірометрів в Україні:

ТАБЛИЦЯ

Підприємство	Назва	Принцип дії
ГСКТБ ФП НАН України, Київ	ДПР-1.1	монохроматичний
	ДПР-1	біхроматичний (спектрального відношення)
Приладобудівний завод, Кам'янець-Подільський	Промінь	оптичний із зникаючої ниткою
	Смотрич-5П	Інфрачервоний, часткового випромінювання
	ТЕРА-50	
Харків-Прилад, Харків	Німбус-530	Інфрачервоний, часткового випромінювання

Однак, на вітчизняному ринку домінують пірометри зарубіжного виробництва: Raynger, Center, Raytek, Fluke и др. При порівняній ціні з вітчизняними приладами (від 1500 до 6000 грн.), вони мають кращі характеристики і зручніші у використанні. Широка номенклатура пірометрів дозволяє вибрати найбільш відповідний прилад для кожного конкретного завдання.

Робота 1.

Основні технічні характеристики пірометра ТЕРА-50.

1. Пірометр ТЕРА-50 призначений для вимірювання температур від 400°C до 2500°C.
2. Робочий інтервал довжин хвиль: 0.4мкм – 4 мкм.
3. Межа основної похибки, що припускається:
 - а) в діапазоні 400-1500°C – $\pm 15^\circ\text{C}$;
 - б) в діапазоні 900-2000°C – $\pm 20^\circ\text{C}$.
4. Номінальний показник візування – 1/20.
5. Номінальна робоча відстань, $1 \pm 0,02$ м.
6. Вихідна напруга 3 – 65 мВ.
7. Час встановлення показників не перевищує 4 сек.

Робота 2

Основні технічні характеристики пірометра ЕОП-66.

Призначений для точного виміру яскравісної температури в інтервалі $900\div 10000^{\circ}\text{C}$.

Технічні характеристики пірометра ЕОП-66.

1. Загальний діапазон вимірюваних температур $900\div 10000^{\circ}\text{C}$ включає чотири діапазона: $900\text{--}2000^{\circ}\text{C}$; $2000\text{--}3000^{\circ}\text{C}$; $3000\text{--}6000^{\circ}\text{C}$; $6000\text{--}10000^{\circ}\text{C}$.
2. Ефективна довжина хвилі $0,65\pm 0,01$ мкм;
3. Межа основної похибки, що припускається $\pm 0.2\%$ від діапазону;
4. Мінімальний розмір об'єкту d , мм.

Таблиця

Градуювальна характеристика лампи СИ10-300

I, A	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8	9.9	10	10.2	10.4	10.6	10.8
T_b, C	777	795	810	825	840	855	868	882	908	930	952	972
T_b, K	1050	1068	1083	1098	1113	1128	1141	1155	1181	1203	1225	1245

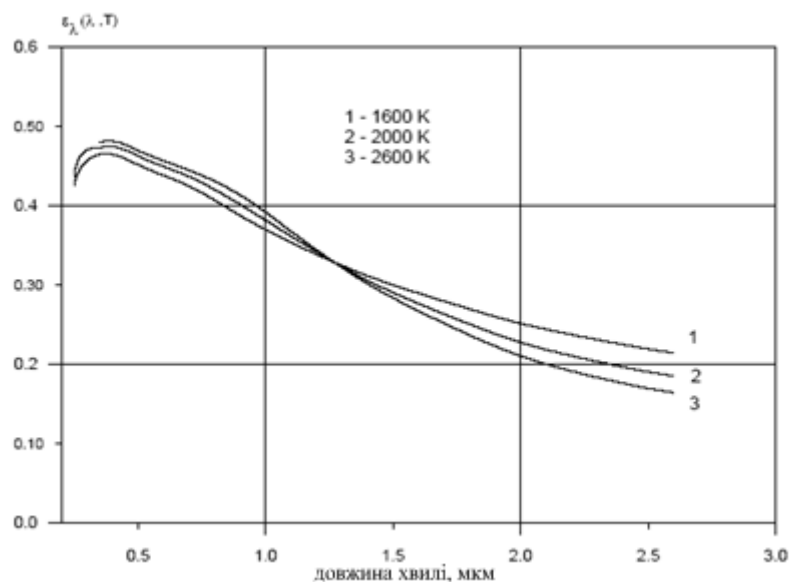


Рис. 1. Залежність коефіцієнту спектральної випромінювальної здатності вольфраму $\varepsilon(\lambda, T)$ від довжини хвилі при різних температурах.

Спектральна випромінювальна здатність вольфраму при різних температурах.

λ , нм	T, К 1000	1200	1400	1600	1800	2000
400	0.487	0.484	0.482	0.479	0.476	0.474
425	0.484	0.481	0.477	0.473	0.470	0.467
450	0.480	0.477	0.473	0.470	0.466	0.463
500	0.468	0.465	0.462	0.459	0.456	0.453
550	0.460	0.458	0.456	0.453	0.451	0.448
600	0.453	0.451	0.449	0.447	0.445	0.443
650	0.446	0.444	0.442	0.440	0.438	0.436
700	0.442	0.440	0.438	0.436	0.434	0.431
750	0.443	0.438	0.434	0.430	0.426	0.422
800	0.441	0.434	0.427	0.420	0.412	0.405

Навчальне видання

**Методичні вказівки
«Оптичні методи вимірювання температур»
до спецкурсів
«Теплопередача», «Газодинаміка горіння»
та спецпрактикуму
«Високотемпературні процеси в дисперсних системах»**

Видано в авторській редакції

Автори:

Калінчак Валерій Володимирович
Орловська Світлана Георгіївна
Карімова Фаріда Фаритівна

Підп. до друку 10.10.2012. Формат 60x84/16.
Гарн. Таймс. Умов.-друк. арк.1,1. Тираж 25 прим.
Зам. № 550

Видавець і виготовлювач:
**Одеський національний університет
імені І.І. Мечникова**

Україна, 65082, м. Одеса, вул. Єлісаветинська, 12
Тел.: **(048) 723 28 39**. E-mail: **druk@onu.edu.ua**
Свідоцтво ДК № 4215 від 22.11.2011 р.