

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ
УКРАЇНИ**

КАФЕДРА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ ДИСЦИПЛІН

**Методичні рекомендації
до лабораторного заняття
з навчальної дисципліни “Фізика”**

**ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ
ВИПРОМІНЮЮЧОГО ТІЛА ЗА ДОПОМОГОЮ
ОПТИЧНОГО ПІРОМЕТРА**

Обговорено та затверджено на засіданні
кафедри фізико-математичних дисциплін
Протокол № ____ від _____ 201 р.

План-конспект лабораторного заняття

«ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ВИПРОМІНЮЮЧОГО ТІЛА ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИЧНОГО ПІРОМЕТРА»

Тема заняття: Вивчення законів теплового випромінювання.

Мета заняття:

— *навчальна:* навчити використовувати знання законів теплового випромінювання для знаходження фізичних величин, пов'язаних з цими законами, зокрема вимірювання термодинамічної температури нагрітого тіла. Ознайомити слухачів з методами наукового пізнання на практиці;

— *виховна:* виховувати інформаційну культуру студентів, увагу, дисциплінованість, самоконтроль;

— *розвиваюча:* розвивати впізнавальний інтерес, мислення, уміння використовувати на практиці фізичні прилади. Забезпечити розвиток експериментальних умінь слухачів і навичок проведення вимірювань фізичних величин.

Тип заняття: закріплення вивченого матеріалу.

Вид заняття: лабораторна робота.

Методи навчання:

пояснювально-ілюстративний:

– більш конкретне, наочне пояснювання слухачам навчального матеріалу;

частково-пошуковий метод:

– пошук слухачами відповідей на сукупність логічних запитань з конкретної теми, спрямованих на виконання лабораторної роботи.

Опорні терміни і поняття: теплове випромінювання, оптична пірометрія, оптичний пірометр, амперметр; вольтметр; реостат.

Основні джерела інформації:

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.3.: Оптика. Квантова фізика. – К.: Техніка, 1999. – 261с., ст. 260-271.

2. ФІЗИКА. Методичні рекомендації з організації самостійної роботи студентів при вивченні дисципліни. / Борисенко В. Г., Деркач Ю.Ф., Кривцова В.І., Умеренкова К.Р. / Х.: НУЦЗУ, 2010, 63 с. (електронний варіант).

3. Опис лабораторної роботи (див.далі).

План заняття та розподіл часу

1. Організаційний етап – 5хв:
 - нагадування правил техніки безпеки для перебування в лабораторії, та під час виконання лабораторної роботи;
 - перевірка наявності запису лабораторної роботи в журналі звітів.
2. Підготовка до виконання лабораторної роботи – 10хв:
 - перевірка домашнього завдання;
 - перевірка готовності до роботи.
3. Виконання лабораторної роботи – 55хв:
 - підготовка лабораторної установки до роботи;
 - проведення прямих і непрямих вимірів, знаходження необхідних похибок вимірів, оформлення таблиць та графіків. Формулювання висновку.
4. Підведення підсумків заняття – 5хв.
5. Домашнє завдання – 5 хв



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

**КАФЕДРА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ
ДИСЦИПЛІН**

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ВИПРОМІНЮЮЧОГО ТІЛА ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОМЕТРА

Укладачі:

В.Г. Борисенко, В.І. Кривцова, К.Р. Умеренкова

**Харків
2019**

Мета роботи. Вивчення законів теплового випромінювання, ознайомлення з методом оптичної пірометрії та використання його для вимірювання термодинамічної температури нагрітого тіла.

Короткі теоретичні відомості.

Як відомо, із всього квазімонохроматичного (з довжиною хвилі λ) світлового потоку $\Phi_{\lambda \text{ пад}}$, що падає на тіло, частина потоку $\Phi_{\lambda \text{ погл}}$ поглинається тілом, частина $\Phi_{\lambda \text{ відб}}$ відбивається, а частина $\Phi_{\lambda \text{ проп}}$ – пропускається. Тоді, згідно з законом збереження енергії виконується рівність

$$\Phi_{\lambda \text{ пад}} = \Phi_{\lambda \text{ погл}} + \Phi_{\lambda \text{ відб}} + \Phi_{\lambda \text{ проп}}. \quad (13.1)$$

Поділивши цю рівність на $\Phi_{\lambda \text{ пад}}$, одержимо

$$\frac{\Phi_{\lambda \text{ погл}}}{\Phi_{\lambda \text{ пад}}} + \frac{\Phi_{\lambda \text{ відб}}}{\Phi_{\lambda \text{ пад}}} + \frac{\Phi_{\lambda \text{ проп}}}{\Phi_{\lambda \text{ пад}}} = 1. \quad (13.2)$$

Величина $\alpha_{\lambda, T} = \Phi_{\lambda \text{ погл}} / \Phi_{\lambda \text{ пад}}$ характеризує поглинальну здатність тіла за температури T в околі довжини хвилі λ , і має назву *спектрального коефіцієнту поглинання або спектральної поглинальної здатності*. Ця безрозмірна величини показує яку долю монохроматичного потоку електромагнітного випромінювання дане тіло поглинає. Аналогічно визначаються *спектральний коефіцієнт відбивання* $\beta_{\lambda, T} = \Phi_{\lambda \text{ відб}} / \Phi_{\lambda \text{ пад}}$ та *спектральний коефіцієнт пропускання* $\tau_{\lambda, T} = \Phi_{\lambda \text{ проп}} / \Phi_{\lambda \text{ пад}}$. З урахуванням цього рівняння (13.2) приймає вигляд

$$\alpha_{\lambda, T} + \beta_{\lambda, T} + \tau_{\lambda, T} = 1. \quad (13.3)$$

Якщо для даного тіла спектральний коефіцієнт поглинання $\alpha_{\lambda, T} = 1$ для всіх довжин хвиль, то таке тіло називається *абсолютно чорним*. Як випливає з визначення, абсолютно чорним є тіло, що поглинає все випромінювання, яке падає на нього. Зрозуміло, що абсолютно чорне тіло – це ідеалізація. Близькі до нього властивості має сажа, зіниця ока, Сонце та ін.

Тіло для якого спектральний коефіцієнт поглинання $\alpha_{\lambda, T}$ менший одиниці і для всіх довжин хвиль однаковий, називається *сірим*.

Поглинуте тілом випромінювання перетворюється в інші види енергії, частіше всього в енергію теплового руху молекул. Тому, поглинаючи електромагнітне випромінювання, тіло нагрівається. В свою чергу, в результаті теплового руху молекул, виникає випромінювання електромагнітних хвиль різної довжини. Воно має назву *теплового*.

Основною властивістю теплового випромінювання є його рівноважність. Це означає, що вся енергія, поглинута тілом із оточуючого випромінювання, випромінюється ним же в навколишнє середовище, тому температура тіла в рівноважному стані залишається сталою.

В тепловому випромінюванні твердих тіл або рідини присутні хвилі всіх довжин в діапазоні від 0 до ∞ , але інтенсивність випромінювання для різних довжин хвиль різна. Для того щоб дати кількісну характеристику випромінювання загалом і розподіл його за довжиною хвилі використовують два основні параметри випромінювання.

Інтегральною інтенсивністю випромінювання R_T називають кількість енергії, що випромінюється з одиниці площі за одиницю часу у всіх напрямках і у всьому інтервалі довжин хвиль, тобто

$$R_T = \frac{dW}{dS dt} = \frac{dP}{dS}, \quad (13.4)$$

де dW – енергія, dS – площа, dt – час, dP – потужність. Цю величину також називають енергетичною світністю або інтегральною випромінювальною здатністю.

Спектральною інтенсивністю випромінювання $r_{\lambda,T}$ називають кількість енергії, що випромінюється з одиниці площі за одиницю часу в усіх напрямках, в розрахунку на одиничний інтервал довжин хвиль, тобто

$$r_{\lambda,T} = \frac{dW}{dS dt d\lambda} = \frac{dP}{dS d\lambda}. \quad (13.5)$$

Цю величину також називають спектральною енергетичною світністю або спектральною випромінювальною здатністю. Як впливає з визначення величина $r_{\lambda,T}$ показує кількісний розподіл енергії випромінювання за довжинами хвиль.

Г.Р. Кірхгоф показав, що за умови термодинамічної рівноваги відношення спектральної інтенсивності випромінювання довільного тіла $r_{\lambda,T}$ до його спектральної поглинальної здатності $\alpha_{\lambda,T}$ визначається однією і тією ж функцією $f(\lambda, T)$ довжини хвилі і температури. Це твердження має назву закону Кірхгофа і може бути записане в вигляді

$$\left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_2 = \dots = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_n = f(\lambda, T), \quad (13.6)$$

де індекси 1, 2, ..., n нумерують тіла, що випромінюють.

Якщо одне з тіл в (13.6) є абсолютно чорним, то для нього $\alpha_{\lambda,T} = 1$. Щоб виділити це тіло серед інших тіл, позначимо його спектральну інтенсивність випромінювання $r_{\lambda,T}^*$. Тоді з (13.6) випливає, що $f(\lambda, T) = r_{\lambda,T}^*$. Отже, невідома функція $f(\lambda, T)$ є спектральна інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла. Тоді очевидно, що можна виразити спектральну інтенсивність випромінювання довільного тіла через спектральну інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла співвідношенням

$$r_{\lambda,T} = \alpha_{\lambda,T} r_{\lambda,T}^*. \quad (13.7)$$

Оскільки $\alpha_{\lambda,T} < 1$ для усіх тіл окрім абсолютно чорного, то зрозуміло, що абсолютно чорне тіло має (за однакових умов) найбільшу спектральну інтенсивність випромінювання.

Аналітичний вигляд спектральної інтенсивності випромінювання $r_{\lambda,T}^*$ абсолютно чорного тіла був одержаний Планком на основі гіпотези про квантову природу випромінювання, тому вона має назву формули Планка

$$r_{\lambda,T}^* = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (13.8)$$

де h – стала Планка, k – стала Больцмана, c – швидкість світла у вакуумі.

Якщо проінтегрувати (13.8) по всьому інтервалу довжин хвиль, то одержимо залежність інтегральної інтенсивності випромінювання від температури, яка має назву закону Стефана - Больцмана

$$R_T^* = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T}^* d\lambda = \sigma T^4, \quad (13.9)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – стала Стефана-Больцмана.

На використанні викладених вище законів теплового випромінювання базується робота *оптичних пірметрів* – приладів, які дозволяють за результатами вимірювань теплового випромінювання віддалених нагрітих тіл визначити їх температуру. Нижче ми розглянемо один з методів вимірювання температури нагрітих тіл за допомогою оптичного пірметра.

Опис лабораторної роботи.

В даній роботі використовується метод візуального порівняння яскравості випромінювання досліджуваного тіла і тіла, що приймається за абсолютно чорне тіло.

Якісно, суть методу вимірювання температури нагрітого тіла полягає у наступному. Нехай є два тіла: досліджуване тіло і абсолютно чорне при однаковій температурі. Оскільки їх температура однакова, то згідно з (13.7) спектральна інтенсивність випромінювання (а візуально, яскравість) абсолютно чорного тіла більша ніж сірого. Очевидно, що для того щоб вирівняти їх випромінювання (яскравість) необхідно, наприклад, зменшити температуру абсолютно чорного тіла. Тоді, за умови збігу яскравості, можна прирівняти спектральні інтенсивності випромінювання і, з одержаного рівняння, знаючи температуру абсолютно чорного тіла, знайти температуру досліджуваного тіла.

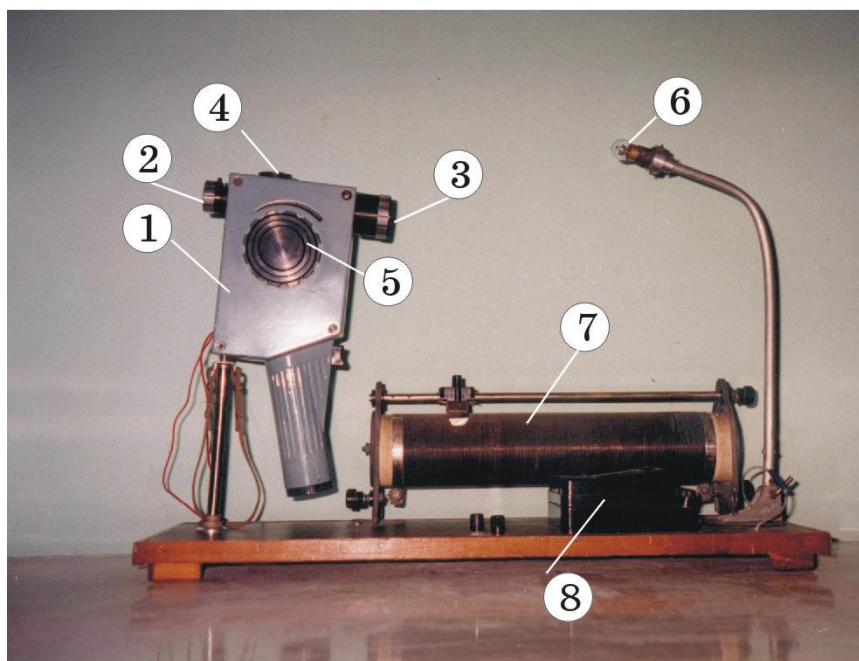
Температура абсолютно чорного тіла, за якої його спектральна інтенсивність випромінювання дорівнює спектральній інтенсивності випромінювання досліджуваного тіла має назву *яскравісної температури досліджуваного тіла*.

Цей метод реалізується в лабораторній установці, зовнішній вигляд якої наведений на рис. 13.1, а, а її схема на рис. 13.1, б. Основними елементами є пірометр 1 та електричне коло живлення досліджуваного нагрітого тіла – спіралі лампи розжарення 6. Зображення спіралі 6 знаходиться в фокальній площині лінзи об'єктиву 3 (рис. 13.1, б). В цій же площині знаходиться нагріта нитка 13 пірометричної лампи 12. Випромінювання нитки пірометра 13 каліброване на випромінювання абсолютно чорного тіла. Яскравість лампи розжарення 6 регулюється реостатом 7, а нитки пірометра 13 реостатом 5. Отже, в полі зору окуляра 2 будуть спостерігатись обидві нитки – як пірометра, так і лампи розжарення. Для спостереження їх в монохроматичному світлі використовується червоний ($\lambda = 0,65$ мкм) світлофільтр 10.

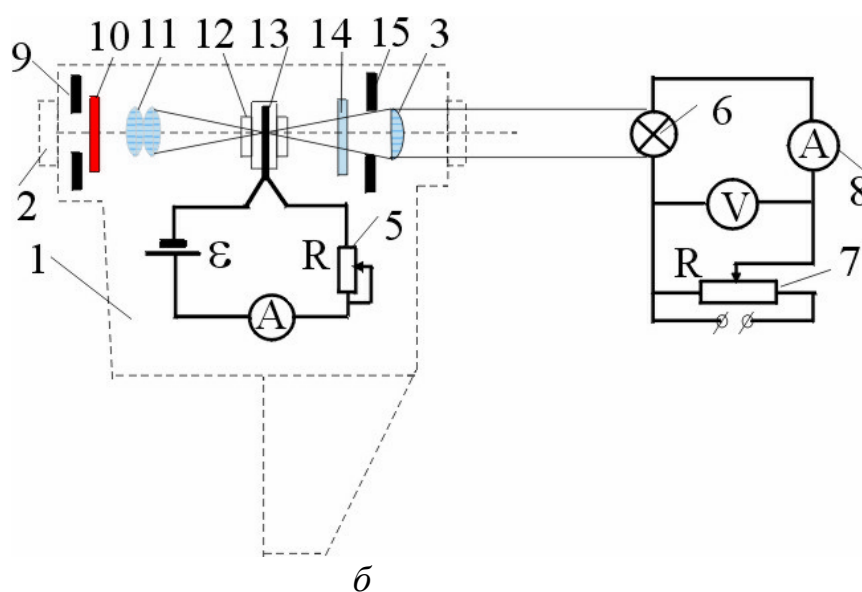
Якщо розмістити зображення спіралі лампочки розжарення так, щоб воно сумістилося в полі зору окуляра з ниткою пірометра, то, регулюючи нагрів нитки пірометра реостатом 5, можна досягти збігу яскравості спіралі 6 та нитки 13. В цей момент зображення нитки зливається з зображенням спіралі, що фіксується як “зникнення” зображення нитки в місці суміщення з зображенням спіралі. Тому іноді пірометр називають пірометром з “ниткою, що зникає”. Саме в цей момент за шкалою пірометра визначається яскравісна температура спіралі лампочки.

Збіг яскравості тіла, що досліджується (спіралі лампочки) та абсолютно чорного тіла (нитки пірометра) відповідає рівнянню

$$r_{\lambda,T} = r_{\lambda,T_y}^* \quad (13.10)$$



a



б

Рис. 13.1. Зовнішній вигляд лабораторної роботи (а) та її схематичне зображення (б):

1 – пірометр; 2 – окуляр; 3 –однолінзовий об'єктив ; 4 – перемикач діапазонів; 5 – реостат для регулювання розжарювання нитки пірометра; 6 – лампа розжарювання; 7 – реостат; 8 – амперметр (вольтметр); 9 – окулярна діафрагма; 10 – червоний світлофільтр; 11 – апланатична лупа; 12 – пірометрична лампа; 13 – нитка пірометра; 14 – поглинальне скло; 15 – діафрагма; 16 – курок пірометра

або, згідно з (13.7), маємо

$$\alpha_{\lambda,T} r_{\lambda,T}^* = r_{\lambda,T_{\text{я}}}^* \quad (13.11)$$

Враховуючи формулу Планка (13.8), одержимо

$$\alpha_{\lambda,T} \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_{\text{я}}}} - 1 \right) = e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1. \quad (13.12)$$

Зваживши, що в умовах досліду $\lambda = 0,65 \cdot 10^{-6}$ м, а очікувана температура $T \approx 1000$ К, маємо

$$\begin{aligned} \exp\left(\frac{hc}{\lambda k T}\right) &= \exp\left(6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 / 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 0,65 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3\right) \\ &\approx e^{20} \gg 1. \end{aligned}$$

Тому, в формулі (13.12) можна знехтувати одиницею, після чого вона буде мати вигляд

$$\alpha_{\lambda,T} e^{\frac{hc}{\lambda k T_{\text{я}}}} = e^{\frac{hc}{\lambda k T}}. \quad (13.13)$$

Логарифмуючи це рівняння, знаходимо

$$\ln \alpha_{\lambda,T} + \frac{hc}{\lambda k T_{\text{я}}} = \frac{hc}{\lambda k T}. \quad (13.14)$$

З останнього маємо

$$T = \frac{T_{\text{я}}}{1 + T_{\text{я}} \lambda k \ln \alpha_{\lambda,T} / hc} = \frac{T_{\text{я}}}{1 + b T_{\text{я}} \ln \alpha_{\lambda,T}}, \quad (13.15)$$

де величина $b = k\lambda/hc \approx 4,52 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$.

Отже, знайшовши яскравісну температуру досліджуваного тіла, за виразом (13.15), легко знайти його термодинамічну температуру.

Завдання.

а) виміряти за допомогою пірометра яскравісну температуру розжареної спіралі лампи;

б) розрахувати термодинамічну температуру спіралі лампи розжарення за вимірними яскравісними температурами, оцінити похибку;

в) вказати причину того, що термодинамічна температура тіла більша ніж його яскравісна температура.

Порядок виконання роботи.

1. Натиснувши курок пірометра, ввімкнути пірометр і, обертаючи окуляр, досягти чіткого зображення нитки пірометра.
2. За допомогою реостату 7 в колі лампи розжарення довести розжарення спіралі лампи до червоного кольору ($T \approx 1000\text{K}$). За допомогою об'єктиву досягти чіткого зображення спіралі лампи в полі зору.
3. Вибрати діапазон вимірювань за допомогою перемикача діапазонів 4. Ввести червоний світлофільтр, що забезпечує спостереження об'єктів випромінювання на довжині хвилі $\lambda = 0,65 \cdot 10^{-6}$ м.
4. Сумістити зображення нитки пірометра і спіралі так, щоб вони перетинались в полі зору.
5. Регулюючи реостат розжарювання 5 нитки пірометра, досягти збігу яскравостей нитки пірометра і спіралі лампи. В момент збігу яскравостей зображення нитки пірометра в місці перетину зливається (“зникає”) з зображенням досліджуваної спіралі лампи.
6. Після досягнення збігу яскравостей за шкалою пірометра визначити яскравісну температуру $T_{я}$ досліджуваного тіла.
7. Після цього за допомогою реостата 5 навмисно порушити збіг яскравостей, збільшуючи (або зменшуючи) яскравість нитки пірометра, а потім знову досягти збігу яскравостей, обертаючи реостат 5 в необхідному напрямі. Потім за шкалою пірометра визначити $T_{я}$. Загалом цю операцію повторити шість разів і одержати шість значень $T_{я,i}$.
8. Одержані значення $T_{я,i}$ занести до таблиці і знайти середнє значення $\bar{T}_{я}$.
9. За графіком (рис. 14.2) залежності $\alpha_{\lambda,T}(T_{я})$ і знайденим значенням $\bar{T}_{я}$

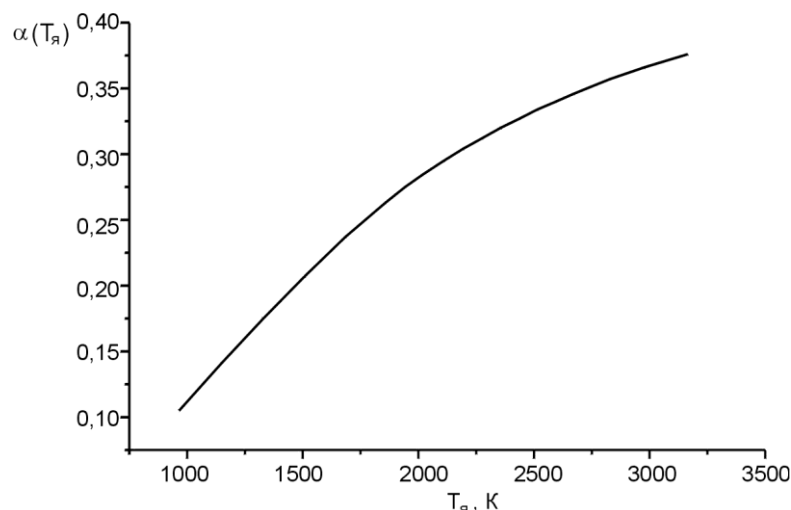


Рис. 13.2. Графік залежності коефіцієнта поглинання від яскравісної температури

визначити спектральний коефіцієнт поглинання $\alpha_{\lambda,T}$.

10. За формулою (13.15) обчислити середню термодинамічну температуру \bar{T} спіралі лампи.
11. Обчислити похибки вимірювань.
12. Дані вимірювань та обчислень занести до таблиці.

Таблиця

	$t_{я,i},$ °C	$T_{я,i},$ K	$\Delta T_{я,i},$ K	$(\Delta T_{я,i})^2,$ K ²	α	$\bar{T},$ K	$\Delta T_{я,вип},$ K	$\Delta T_{я,сист},$ K	$\Delta \bar{T},$ K
1									
2									
·									
·									
·									
	$\bar{T}_я =$		$\sum_i (\Delta T_{я,i})^2 =$						

13. Результати вимірювань записати в вигляді $T = \bar{T} \pm \Delta \bar{T}$.

Контрольні питання.

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Дайте визначення інтегральної інтенсивності випромінювання.
3. Дайте визначення спектральної інтенсивності випромінювання.
4. Дайте визначення спектрального коефіцієнту поглинання.
5. Сформулюйте закон Кірхгофа.
6. Яке тіло називається абсолютно чорним?
7. Яке тіло має назву сірого?
8. Сформулюйте закон Стефана-Больцмана.
9. Викладіть суть методу вимірювання температури нагрітих тіл за допомогою оптичного пірометра.
10. Дайте визначення яскравісної температури.
11. Чому яскравісна температура досліджуваного тіла завжди менша його термодинамічної температури?

Література.

- [1]. І.Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.3.: Оптика. Квантова фізика. – К.: Техніка, 1999. – 261с., ст. 260-271.
- [2]. Физический практикум. Под ред. В.И.Ивероновой. М: Гос.изд-во физ.- мат. л-ры, 1962.
- [4]. Пирометр визуальный промышленный «Проминь». Техническое описание и инструкция по эксплуатации.