

Лабораторна робота № 3-8

ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Мета роботи: перевірка закону та визначення сталої Стефана-Больцмана.

Короткі теоретичні відомості

Для теплового випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ), тобто тіла з поглинальною здатністю $\alpha_{\lambda T} = 1$, є чинним закон Стефана-Больцмана:

$$R^*(T) = \sigma T^4 \quad (8.1)$$

де R^* – енергетична світність (інтегральна випромінювальна здатність) тіла, T – його температура, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ – стала Стефана-Больцмана (теоретичне значення сталої визначається за формулою $\sigma = \frac{2\pi^2 k^4}{15c^2 h^3}$, де c – швидкість світла; h – стала Планка; k – стала Больцмана).

Енергетична світність пов'язана з випромінювальною здатністю $r_{\lambda T}$ співвідношенням:

$$R = \int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda$$

де $r_{\lambda T}$ – випромінювальна здатність тіла.

У відповідності до закону Кірхгофа для будь-якого тіла:

$$r_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} \varphi(\lambda, T) \quad (8.2)$$

де $\varphi(\lambda, T)$ – універсальна функція Кірхгофа, яка співпадає з випромінювальною здатністю АЧТ і визначається формулою Планка:

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (8.3)$$

Спектр теплового випромінювання *нечорного* тіла відповідно до (8.2) залежить від $\alpha_{\lambda T}$. У загальному випадку він може значно відрізнятись від спектра АЧТ (8.3). Однак є тіла, для яких $\alpha_{\lambda T} < 1$ і при $T = \text{const}$ мало залежить від λ , тобто можна вважати $\alpha_{\lambda T} = \alpha_T$. Такі тіла називають *сірим*. Очевидно, що для сірого тіла $r_{\lambda T} = \alpha_T \cdot r_{\lambda T}^*$

Енергетична світність $R(T)$ дорівнює:

$$R(T) = \alpha_T R^* = \alpha_T \sigma T^4 \quad (8.4)$$

Це співвідношення можна розглядати як узагальнення закону Стефана-Больцмана, коефіцієнт α_T називають ступенем чорноти тіла.

У цій роботі досліджується залежність потужності теплового випромінювання спіралі лампи розжарювання від температури. Матеріал спіралі – вольфрам – можна вважати сірим тілом, тому для нього чинне співвідношення (8.4).

При достатньо високій температурі потужність, що підводиться до спіралі, майже повністю витрачається на випромінювання. Тому має виконуватися співвідношення:

$$W = IU = S\alpha_T\sigma T^4 - W'$$

де I , U – струм і напруга спіралі; S – площа поверхні спіралі; W' – потужність теплового випромінювання, що поглинається спіраллю.

Величина $W' \sim T_C^4$, де T_C – температура навколишнього середовища.

Оскільки $T_C \ll T$, величиною W' можна знехтувати й прийняти

$$W = S\alpha_T\sigma T^4 \quad (8.5)$$

звідки можна визначити сталу Стефана-Больцмана:

$$\sigma = \frac{W}{S \cdot \alpha_T \cdot T^4} \quad (8.6)$$

Для перевірки чинності залежності $R(T) \sim \alpha_T T^4$ (закон Стефана-Больцмана для сірого тіла) запишемо (8.6) у вигляді $W = \sigma S \alpha_T T^n$, звідки

$$\lg\left(\frac{W}{\alpha_T}\right) = \lg(\sigma \cdot S) + n \cdot \lg T \quad (8.7)$$

Таким чином, n можна визначити як кутовий коефіцієнт лінійної залежності:

$$\lg\left(\frac{W}{\alpha_T}\right) = f(\lg T)$$

Для сірого тіла теоретичне значення показника степеня $n_{теор} = 4$. Порівняння експериментально отриманого значення n та $n_{теор}$ дає можливість оцінити в якій мірі виконується закон Стефана-Больцмана для даного тіла. У вирази (8.6) та (8.7) входить α_T (ступінь чорноти вольфраму). Залежність $\alpha_T(T)$ для різних матеріалів отримують у результаті реальних експериментальних досліджень. $\alpha_T(T)$ для вольфраму задано у вигляді таблиці, що знаходиться на робочому місці.

Вимірювання температури тіла за допомогою оптичного пірометра.

Температуру сильно нагрітих тіл можна вимірювати оптичним методом за допомогою оптичних пірометрів.

У даній роботі використовується пірометр, за допомогою якого вимірюється так звана *яскравісна температура*. Принцип вимірювання полягає у візуальному порівнянні яскравості досліджуваного розжареного тіла та еталонного (нитка розжарення пірометричної лампи), яке приймається за АЧТ. Змінюючи температуру нитки пірометричної лампи, домагаються вирівнювання її яскравості з яскравістю досліджуваного тіла.

Таким чином, яскравісна температура тіла – це така температура АЧТ, при якій його яскравість дорівнює яскравості досліджуваного тіла. Порівняння яскравостей проводиться у вузькому інтервалі довжин хвиль в околі певного значення λ , що виділяється світوفільтром (у роботі $\lambda_0 = 0.66$ мкм).

Для нечорного тіла яскравісна температура T_λ відрізняється від істинної (термодинамічної) температури T і в загальному випадку залежить від λ . Зв'язок між T_λ і T можна отримати через закон Кірхгофа (8.2) і формулу Планка (8.3), враховуючи, що в умовах даної роботи яскравість пропорційна випромінювальній здатності тіла $r_{\lambda T}$:

$$\alpha_{\lambda T} \varphi(\lambda, T) = \varphi(\lambda, T_\lambda)$$

Оскільки для видимого випромінювання $\frac{hc}{\lambda} \gg kT$ у формулі (8.3) можна прийняти $e^{\frac{hc}{\lambda \cdot kT}} - 1 \approx e^{\frac{hc}{\lambda \cdot kT}}$ і записати попередній вираз у вигляді:

$$\alpha_{\lambda T} e^{\frac{hc}{\lambda \cdot kT}} \cong e^{\frac{hc}{\lambda \cdot kT_\lambda}},$$

звідки

$$\ln \alpha_{\lambda T} = \frac{hc}{\lambda k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\lambda} \right)$$

Але $\ln \alpha_{\lambda T} = \frac{hc}{\lambda k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\lambda} \right) \approx -\frac{hc}{\lambda k} \frac{\Delta T}{T_\lambda^2}$, де $\Delta T = T - T_\lambda$, тому для визначення термодинамічної температури T можна використати формулу:

$$T = T_\lambda + \Delta T, \quad (8.8)$$

$$\Delta T \cong -\frac{\lambda k}{hc} \ln \alpha_{\lambda T} T_\lambda^2 \quad (8.9)$$

Оскільки $\ln \alpha_{\lambda T} < 0$ то $\Delta T > 0$, тобто ΔT завжди додатна поправка до температури, що вимірюється за допомогою пірометра (для нечорних тіл яскравісна температура завжди менше від термодинамічної).

Отже, знаючи $\alpha_{\lambda T}$ для даного тіла, термодинамічну температуру T визначають за яскравісною температурою T_λ .

Опис експериментальної установки

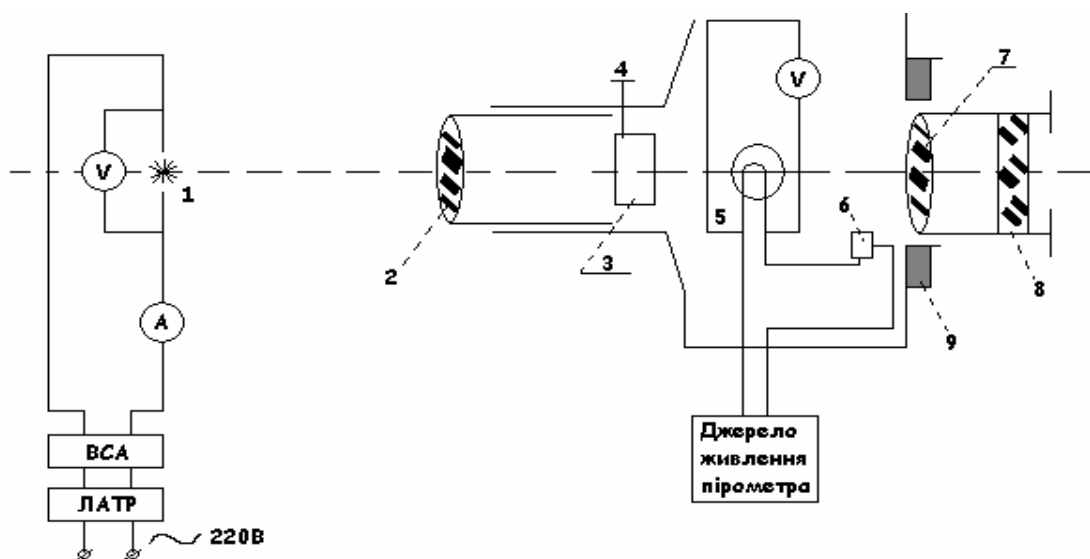


рис. 8.1

Принципову схему установки й будову оптичного пірометра зображено на рис.8.1., де 1 – джерело світла (лампа розжарення); 2 – об’єктив пірометра; 3 – димчастий світлофільтр; 4 – ручка введення димчастого світлофільтра; 5 – піротехнічна лампа; 6 – реостат; 7 – окуляр; 8 – червоний світлофільтр ($\lambda_0 = 0.66 \text{ мкм}$); 9 – барабан реостата.

Джерело світла та пірометр встановлено на оптичній лаві. Об’єктив пірометра дає зображення об’єкта (спіраль досліджуваної лампи) у місці розташування нитки розжарення пірометричної лампи 5. Яскравість лампи 5 регулюється зміною струму розжарення за допомогою реостата 6 шляхом обертання барабана 9, який пов’язаний з повзунком реостата.

Яскравість пірометричної лампи змінюють доти, доки вона не зрівняється з яскравістю зображення спіралі досліджуваної лампи, і записують покази пірометра, що проградуєований у градусах Цельсія.

Димчастий світлофільтр призначений для послаблення яскравості досліджуваного тіла у випадках, коли його температура перевищує 1400°C (щоб уникнути перегріву пірометричної лампи). Шкала $700\text{--}1400^\circ\text{C}$ відповідає роботі без димчастого світлофільтра, а $1200\text{--}2000^\circ\text{C}$ зі введеним світлофільтром.

Яскравість зображення спіралі, що створюється лінзою, дорівнює яскравості самої спіралі.

Порядок виконання роботи

Відповідно до інструкції, що знаходиться на робочому місці, ввімкнути установку і підготувати до роботи пірометр. Ввести червоний світлофільтр ($\lambda_0 = 0.66 \text{ мкм}$). Регулюючи розжарення досліджуваної лампи зміною струму й напруги, виміряти яскравісну температуру спіралі досліджуваної лампи ($t_\lambda, ^\circ\text{C}$) для 7–10 значень потужності W , що підводиться. Значення $T_\lambda = t_\lambda + 273$, а також U та I занести до таблиці 8.1. При досягненні температури 1400°C ввести димчастий світлофільтр, і далі для визначення температури користуватись нижньою шкалою. В області $1200\text{--}1400^\circ\text{C}$ для перевірки провести вимірювання температури у двох-трьох точках за обома шкалами.

За формулою (8.8) визначити термодинамічну температуру спіралі T , використовуючи розміщений на робочому місці графік $\Delta T = f(T_\lambda)$ для вольфраму, розрахований за формулою (8.9). Значення T занести до таблиці 8.1.

За даними таблиці на робочому місці побудувати на міліметровому папері графік залежності $a_T(T)$ і по ньому знайти значення a_T для температур T , що занесені до таблиці 8.1.

Обробка результатів вимірювань

1. Підрахувати й занести до таблиці 8.1 значення потужності W .
2. Розрахувати величини $\lg\left(\frac{W}{a_T}\right)$ і $\lg(T)$, занести до таблиці 8.1.
3. Використовуючи дані таблиці 8.1 і задане значення S підрахувати за формулою (8.6) сталу Стефана-Больцмана σ для кожної з температур. Визначити середнє значення $\langle \sigma \rangle$ і вибірковий стандарт середнього $S_{\langle \sigma \rangle}$. Результати занести до таблиці 8.2.

4. На аркуші паперу побудувати графік залежності $\lg\left(\frac{W}{a_T}\right) = f(\lg T)$ за ним визначити n :

$$n = \frac{\lg\left(\frac{W}{a_T}\right)}{\Delta \lg T}.$$

5. Занести результати п.3 та п.4 до таблиці 8.2.

Таблиця 8.1.

| № | I, A | U, B | W, Bm | T_λ, K | T, K | a_T | $\sigma, 10^{-8} Bm/m^2 \cdot K^4$ | $\lg\left(\frac{W}{a_T}\right)$ | $\lg(T)$ |
|---|--------|--------|---------|----------------|--------|-------|------------------------------------|---------------------------------|----------|
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | |

Таблиця 8.2.

| $\langle \sigma \rangle$ | $S_{\langle \sigma \rangle}$ | n |
|--------------------------|------------------------------|-----|
| | | |

Контрольні питання

1. Що називається тепловим випромінюванням? Дайте визначення поняттям «енергетична світність», «випромінювальна здатність тіла». Який між ними зв'язок?
2. Що називається поглинальною здатністю тіла? Сформулюйте закон Кірхгофа. Що таке абсолютне чорне тіло?
3. Яка гіпотеза береться за основу у виведенні формули Планка для теплового випромінювання абсолютно чорного тіла?
4. Як із формули Планка отримати закони Віна і Стефана-Больцмана?
5. Що таке сіре тіло? Як сформулювати закон Стефана-Больцмана для сірого тіла?
6. Що називається яскравісною температурою тіла? Пояснити принцип дії оптичного пірометра.

7. Як пов'язані між собою яскравісна температура та термодинамічна температура тіла? Чи може яскравісна температура залежати від довжини хвилі світлофільтра, що використовується у пірометрі?
8. Чи є випромінювання досліджуваної нагрітої спіралі рівноважним? Чому її випромінювання повинно підпорядковуватись закону Стефана-Больцмана?
9. Про що може свідчити відхилення експериментально визначеної величини показника n від 4?

Література

1. І.М.Кучерук, І.Т.Горбачук. Загальний курс фізики. Т.3.-К.:Техніка,1999
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. – М.:Наука, 1987
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. -М.:Наука, 1980
4. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. -М.:Высшая школа. 1976