

## Лабораторна робота № 6.81.

### Дослідження випромінювання абсолютно чорного тіла і визначення сталої Стефана-Больцмана

**Мета роботи.** Дослідження залежності повної і випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла від температури і визначення сталої Стефана - Больцмана.

**Прилади й приналежності.** Електрична піч, термостовпчик, вимірювальний пристрій.

#### Теоретичний вступ

Будь-яке тіло, якщо його нагріти, починає світитися, і чим вище температура тіла, тим яскравіше воно світиться.

**Тепловим випромінюванням** називається електромагнітне випромінювання тіла, обумовлене збудженням атомів або молекул тіла внаслідок їх теплового руху. Тому характеристики теплового випромінювання залежать від температури тіла.

Уявімо собі нагріті тіла всередині теплоізолюваної оболонки з ідеально відбиваючими стінками, які не випускають випромінювання назовні. Випромінювання тіл, відбиваючись оболонкою, знову поглинається ними. Таким чином, між тілами і випромінюванням, що заповнює оболонку, відбувається безперервний обмін енергією. Дослід показує, що всі тіла набудуть однієї й тієї температури.

Якщо енергія, поглинена тілом, дорівнює енергії, що втрачається тілом при випромінюванні, то стан системи тіло - випромінювання називається *рівноважним*. Дослід показує, що єдиним видом випромінювання, яке може перебувати в рівновазі з тілами, що випромінюють, є теплове випромінювання.

Енергія випромінювання всіх можливих частот, що випускається в одиницю часу одиницею поверхні випромінюючого тіла, називається **енергетичною світністю  $R$**  або *інтегральною випромінювальною здатністю тіла*.

Теплове випромінювання складається з електромагнітних хвиль різних частот. Щоб знати, в якому діапазоні частот випромінюється енергія, вводять диференціальну характеристику  $r_\omega = r(\omega, T)$ . Це кількість енергії, що випускається в одиницю часу одиницею поверхні тіла в одиничному інтервалі частот. Таку характеристику називають **випромінювальною здатністю** тіла або *спектральною густиною потоку випромінювання*.

Величини  $R$  і  $r_\omega$  пов'язані між собою очевидним співвідношенням.

$$R = \int_0^{\infty} r(\omega, T) d\omega$$

**Поглинальною здатністю** тіла  $a_\omega$  або спектральним коефіцієнтом поглинання називається величина, що показує, яку частку падаючого випромінювання

поглинає тіло в кожному інтервалі частот. Це безрозмірна величина, яка не перевищує одиницю.

Тіло, здатне поглинати за будь-якої температури все падаюче на нього випромінювання всіх частот, називається **абсолютно чорним** (надалі позначено як АЧТ). Для нього  $a_{\omega} \equiv 1$ . Тіл з такими властивостями в природі не існує. Це є фізична абстракція. Дуже близькою моделлю абсолютно чорного тіла є невеликий отвір в замкнутій оболонці з будь-якого матеріалу. Луч, що проникає в таку оболонку, здійснює в ній багаторазове відбивання і практично не виходить з неї.

Відповідно до **закону Стефана - Больцмана** (встановленому емпірично Й. Стефаном і підтвердженому розрахунком Л. Больцманом)

$$R = \sigma T^4, \quad (1)$$

енергетична світність АЧТ пропорційна четвертому ступеню його абсолютної температури. Коефіцієнт пропорційності

$$\sigma = 5,668 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

називається *сталю Стефана-Больцмана*. Її величина визначається за даними дослідів.

Абсолютно чорних тіл, як уже вказувалося, в природі не існує. Однак можна виконати різні моделі, випромінювання яких з достатньою для практичних цілей точністю наближається до випромінювання АЧТ. На практиці в якості моделей АЧТ використовують різні печі, наприклад, трубчасті печі з вогнетривкою керамічною оболонкою, на зовнішній поверхні якої розміщують обмотки для електричного обігріву порожнини.

Для вимірювання температур використовується явище Зеєбека. Воно полягає в наступному. Якщо в замкнутому контурі з двох різнорідних провідників підтримувати місця з'єднання цих провідників (спай) за різних температур, то в такому колі виникає струм.

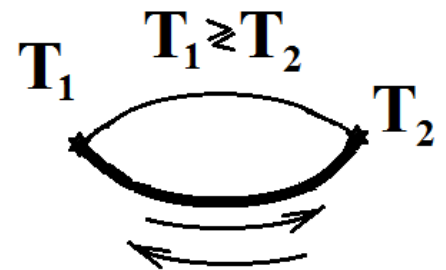
Електрорушійна сила, яка обумовлює цей струм, прямо пропорційна різниці температур в контактах:

$$E = \alpha (T_1 - T_2).$$

Ця е.р.с. називається **термоелектрорушійною силою**.

Датчики температур - *термопари* - складаються з двох з'єднаних між собою різнорідних металевих провідників. Один спай поміщають в середовище, температуру якого треба визначити. Другий спай знаходиться при кімнатній температурі і забезпечений вимірювальним приладом.

Чутливість термопар буде вищою, якщо їх з'єднувати послідовно. Ці з'єднання називаються **термостовпчиками**.



### Опис установки

Установка складається з електропечі, приймача випромінювання (термостовпчика  $T_C$ ) і вимірювального пристрою (рис. 1). Всі прилади - піч, термостовпчик і вимірювальний пристрій - встановлюються на лабораторному столі і з'єднуються між собою кабелями.



Рис. 1.

*Електроніч* має отвір на передній стінці, через яке виходить випромінювання (рис. 2). Отвір служить АЧТ. На верхній кришці печі розміщений регулятор швидкості нагрівання печі. На передній панелі також розміщені клавіші «Мережа» і «Вентилятор».

На передній панелі *вимірювального пристрою* розміщені цифрові трьохрядні індикатори напруги термостовп-

чика (мВ) і температури електропечі ( $^{\circ}C$ ).

Температура всередині печі вимірюється термопарою, один спай якої знаходиться всередині печі, інший - зовні. За величиною термоЕРС, що виникає, прилад вказує температуру гарячого спаю, тобто теплового випромінювання всередині печі, в градусах Цельсія ( $^{\circ}C$ ).

Напруга термостовпчика  $U_{TC}$  пропорційна енергетичній світності отвору печі (абсолютно чорного тіла), тобто абсолютній температурі випромінювання в 4-му ступені.

### **Теорія дослідю**

**Ідея дослідю** полягає в тому, щоб, використовуючи модель АЧТ (**піч**), виміряти температуру теплового випромінювання **термопарою** безпосередньо **всередині печі**, тобто контактним способом, **та оптичним способом** за допомогою **термостовпчика**.

Потім, виражаючи різними способами потік теплового випромінювання, що приймається термостовпчиком, визначають сталу Стефана-Больцмана.

Якщо вважати, що віконце в печі випромінює як АЧТ, то потік випромінювання з нього дорівнює

$$\Phi_{\text{ВИПР}} = \sigma T^4 \cdot S_{\text{ВИПР}}, \quad (1)$$

де  $\sigma$  - стала Стефана-Больцмана,  $T$  - абсолютна температура випромінювання,  $S_{\text{ВИПР}}$  - площа віконця в печі.

Однак до приймача випромінювання (термостовпчика ТС) з площею віконця  $S_{\text{ПР}}$ , розміщеного на відстані  $l$  від вихідного віконця печі, доходить не весь потік випромінювання, а тільки його частина  $\left(\frac{\Omega}{2\pi}\right)$ . Це випромінювання, що

поширюється всередині тілесного кута  $\Omega = \frac{S_{\text{ПР}}}{l^2}$ , під яким є видною площа віконця приймача з боку площини вихідного віконця печі (рис. 2).

$$\Phi_{\text{ПР}} = \Phi_{\text{изл}} \frac{\Omega}{2\pi}. \quad (2)$$

Або з урахуванням (1)

$$\Phi_{\text{ПР}} = \frac{\sigma T^4 S_{\text{изл}} S_{\text{ПР}}}{2\pi^2}. \quad (3)$$

Потік  $\Phi_{\text{ПР}}$ , що приймається термостовпчиком, визначається показаннями вольтметра  $U_{\text{ТС}}$ , виведеними в лівому індикаторі вимірювального пристрою:

$$\Phi_{\text{ПР}} = b U_{\text{ТС}}. \quad (4)$$

Тут  $b$  - коефіцієнт пропорційності, що залежить від конструкції установки. Об'єднуючи (3) і (4), отримаємо робочу формулу

$$\sigma = \frac{2\pi b l^2}{S_{\text{ВИПР}} S_{\text{ПР}}} \frac{U_{\text{ТС}}}{T^4} = K \frac{U_{\text{ТС}}}{T^4} \quad (5)$$

Коефіцієнт  $K$  розраховується за даними установки:

$S_{\text{ВИПР}} = 7,854 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ ,  $S_{\text{ПР}} = 5,027 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ ,  $l = 4,750 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ .  $b = 6,073 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/мВ}$  і дорівнює

$$K = 1,909 \cdot 10^4 \text{ Вт/(мВ м}^2\text{)}.$$

Отже, відзначаючи на вимірювальному пристрої кожну пару значень  $U_{\text{ТС}}$  і  $T$ , можна за формулою (5) розрахувати сталу Стефана-Больцмана.

### Порядок виконання роботи

1. Увімкніть на задній панелі вимірювального пристрою кнопку «Мережа» і дайте прогрітися йому протягом 5 хв. При цьому на індикаторах повинні бути нулі.

2. Увімкніть піч, натиснувши кнопку «Мережа» на її передній панелі (при цьому регулятор швидкості нагрівання печі знаходиться в положенні «Min»). Крім того, варто обов'язково включити вентилятори охолодження, натиснувши кнопку «Вент», щоб уникнути перегріву корпусу печі.

3. За допомогою ручки регулювання швидкості нагріву на кришці печі встановіть за вказівкою викладача початкову швидкість нагріву печі (рекомендується режим 3). Далі швидкість нагріву регулюйте зміною режимів: реж. 3 для діапазо-

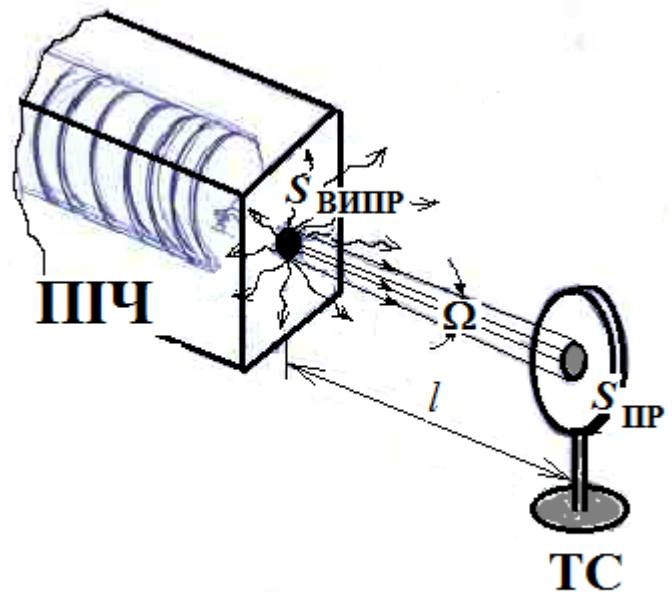


Рис. 2.

ну температур 0 - 150 °С, реж. 4 - для 150 - 300 °С, реж. 5 - для 300 - 450 °С, реж. 6 - для 450 - 600 °С. Нагріваючи таким чином поступово піч, запишіть залежність напруги термостовпчика від температури в печі  $t$ , починаючи з 300°С і до 600°С через кожні 50°. Зняття показань слід проводити, коли цифри на індикаторах не змінюються або, в крайньому випадку, змінюються дуже повільно.

4. Закінчивши вимірювання, поверніть регулятор швидкості нагрівання в положення «Min». Вимкніть кнопку «Мережа» на передній панелі печі. При цьому почнеться охолодження печі, тому вентилятор повинен продовжувати працювати до повного охолодження печі. Після чого вимкніть установку з мережі.

Оскільки термопара визначає різницю температур печі і навколишнього середовища, то, щоб отримати температуру в печі, потрібно до отриманого значення  $t$  °С додати температуру навколишнього середовища і перевести в кельвіни:

$$T = (t + t_{от} + 273) \text{ К.}$$

Таблиця.

№ п/п	$t$ °С	$T$ , К	$T^4$	$U_{ТС}$ , мВ	$\frac{U_{ТС}}{T^4}$	$\sigma_i$	$\langle \sigma \rangle$	$\Delta \sigma_i$	$S_{\langle \sigma \rangle}$	$t_{\alpha, n}$	$\Delta \sigma$	Е %
1	300											
2	350											
3	400											
4	450											
5	500											
6	550											
7	600											

Величина  $\Delta \sigma$  обчислюється за стандартною процедурою статистичної обробки даних експерименту.

Остаточний результат подайте у вигляді  $\sigma = \langle \sigma \rangle \pm \Delta \sigma$ , при  $\alpha = 0,9$ .

### Контрольні питання

1. Яке випромінювання називається тепловим?
2. У чому полягає рівноважний характер теплового випромінювання?
3. Дайте визначення спектральної густини енергетичної світності (випромінювальної здатності) тіла і спектральної поглинальної здатності.
4. Чорне тіло нагріли від температури  $T_1 = 500 \text{ К}$  до  $T_2 = 2000 \text{ К}$ . Визначте, у скільки разів збільшилась його енергетична світність.
5. Яке тіло називається абсолютно чорним? Що являє собою об'єкт дослідження в даній роботі?
6. Сформулюйте закон Стефана - Больцмана.
7. Розкажіть пристрій термопари і принцип вимірювання температур з її допомогою. Як вимірюється термоЕРС?

### Література

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т, П. Загальний курс фізики у трьох томах : навч. посіб. Київ: Техніка, 2006. Т. 3: Оптика. Квантова фізика. 518 с.
2. Курс фізики (під редакцією Лопатинського І.Є.. – Львів. – ”Бескід Біт”. – 2002.

3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики. Кн.2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. К. «Либідь», 2001. – 422 с.
4. Загальна фізика. Лабораторний практикум.: Навч. посібник./ В.М.Барановський, П.В.Бережний, І.Т.Горбачук. та ін.. За заг. ред.. І.Т.Горбачука. – К. Вища шк., 1992 – 509 с.
5. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах Ч. 6. Квантова фізика. [Текст]: Навчальний посібник: - Д. Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2020. - 92 с.

Укладач Гаркуша І.П.