

Лабораторна робота № 6.68

Визначення сталої Стефана - Больцмана за допомогою оптичного пірометра

Мета роботи. Вивчення законів теплового випромінювання та експериментальне визначення сталої Стефана-Больцмана за допомогою оптичного пірометра.

Прилади й приналежності.

1. Лабораторна установка, що містить електричну спіраль, яка розігрівається струмом. Спіраль виготовлена з ніхромового дроту (ніхром - тугоплавкий сплав нікелю з хромом з доавками інших металів) і поміщена в захисний кожух з вікном. Регулятор напруги, амперметр, вольтметр.

2. Оптичний пірометр із зникаючою ниткою.

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_{ω} пов'язані між собою очевидним співвідношенням.

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

Поглинальною здатністю тіла a_{ω} 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.

Якщо поглинання випромінювання відбувається не повністю, то тіло називають **сірим**. Для абсолютно чорних тіл: $a_{\text{АЧТ}} \equiv 1$, а для сірих - $a_{\text{сір}} < 1$.

Реальні тіла не є чорними, і для кожного з них в формулу Стефана - Больцмана доводиться вводити множник, менший одиниці (поглинальну здатність даного тіла). Ці множники визначаються емпірично.

Для реальних тіл на підставі закону Стефана-Больцмана можна визначити потужність випромінювання у всьому інтервалі частот W :

$$W = \alpha_{\text{сер}} S \sigma T^4 \quad (2)$$

де S - площа поверхні нагрітого тіла; $\alpha_{\text{сер}}$ - коефіцієнт чорноти реального тіла.

Теплове випромінювання можна використовувати для вимірювання температур нагрітих тел. Методи вимірювання високих температур, засновані на законах рівноважного випромінювання, називаються **оптичною пірометрією**.

Оптичні пірометри при вимірюванні температур реальних тіл показують не справжню, а умовну температуру, нижчу в порівнянні з дійсною - так звану **яскравісну температуру**.

Пірометр показує температуру T такого чорного тіла, яскравість якого є однаковою з яскравістю даного тіла. **Яскравісною температурою** деякого тіла називається така температура АЧТ, за якої його інтенсивність випромінювання для будь-якої певної частоти дорівнює інтенсивності випромінювання реального тіла для тієї ж частоти. Оскільки для нечорного тіла інтенсивність випромінювання за певної температури буде завжди нижче, ніж у АЧТ, то справжня температура тіла буде завжди вище яскравісної.



Опис установки

В якості випромінюючого тіла в роботі використовується розжарена ніхромова спіраль. Яскравісна температура ніхромової спіралі вимірюється за допомогою оптичного пірометра із зникаючою ниткою. Принцип визначення температури заснований на візуальному порівнянні яскравості розжареної нитки лампи пірометра з яскравістю розжареної спіралі випромінюючого тіла. Тут використовується закон: якщо однакові яскравості випромінювання, то однакові і температури.

Нитка розжарення лампи пірометра підключена до акумулятора. Струм розжарення регулюється реостатом R , вмонтованим в стійку пірометра. Зміна опору реостата в процесі вимірювання здійснюється обертанням рифленого кільця, розташованого перед шкалою пірометра.

Шкала гальванометра G , включеного в коло розжарення лампи, заздалегідь проградуєвана в градусах Цельсія за випромінюванням абсолютно чорного тіла. Пірометр має дві шкали: від 800 до 1400 °С і від 1200 до 2000 °С.

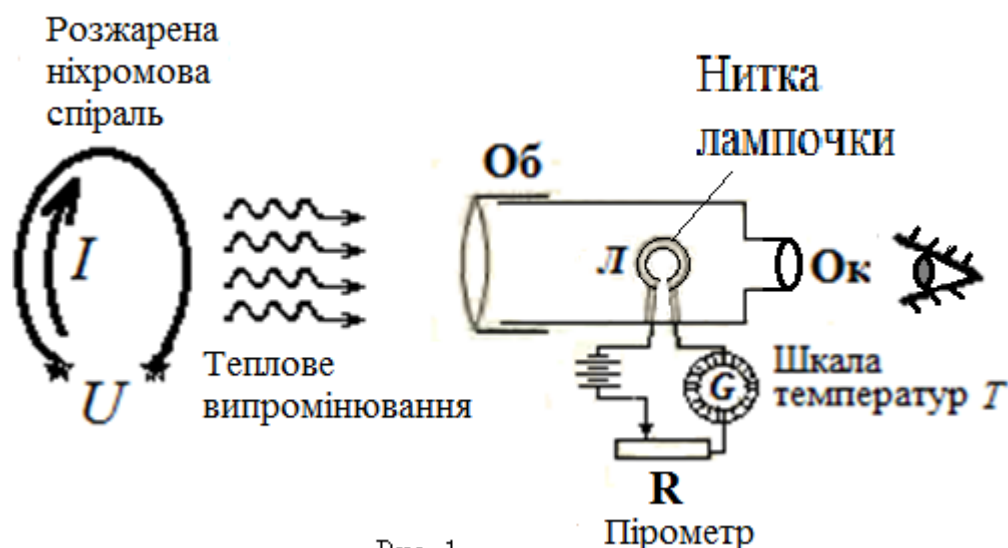


Рис. 1.

Схема досліду дана на рис. 1.

За допомогою об'єктива $Об$ отримують зображення розжареної спіралі. У площині зображення розміщена нитка лампочки $Л$ пірометра.

Спостерігаючи через окуляр $Ок$, підбирають за допомогою реостата R таке розжарення нитки лампочки $Л$, щоб її яскравість збігалася з яскравістю зображен-

ня спіралі (в цьому випадку нитка «зникає», тобто становиться нерозрізненою на тлі зображення). Оскільки досліджуване джерело тепла теж є розжареною ниткою, то спостерігають за місцем їх перетину. При недостатньому розжаренні лампи в приладі місце їх перетину буде темним, при надмірному - світлим. Показання за шкалою температур знімають, коли яскравості обох джерел є однаковими.

Температури нитки і розжареної спіралі будуть рівними і можуть бути визначені за показаннями приладу G .

Нагрівання ніхромової спіралі здійснюють струмом, падіння напруги на спіралі U і силу струму в ній I фіксують вольтметром і амперметром. Це дозволяє визначити потужність, що виділяється в спіралі за рахунок проходження струму.

У даній роботі для визначення сталої Стефана-Больцмана використовують **метод прирівнювання потужності електричного струму**, яка витрачається на розігрів ніхромової спіралі, і **потужності випромінювання з її поверхні**.

Згідно із законом Джоуля-Ленца теплова **потужність струму**, що йде на розігрів спіралі, дорівнює IU .

Оскільки для ніхрому поглинальна здатність менше за одиницю, то потужність випромінювання з одиниці площі визначається формулою $R = a_{\omega} \sigma T^4$.

Якщо знехтувати втратами тепла, можна прирівняти обидві потужності:

$$IU = RS = a_{\omega} \sigma T^4 S, \quad (3)$$

де S - повна площа поверхні розжареної ніхромової спіралі, $S = 2,46 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, $a_{\omega} = 0,85$, T - температура ніхромової спіралі, визначена за допомогою оптичного пірометра.

Вирішивши отримане рівняння щодо σ , можна отримати вираз для розрахунку сталої Стефана-Больцмана:

$$\sigma = \frac{IU}{a_{\omega} S T^4}. \quad (4)$$

Техніка безпеки

1. Установка підключається до джерела змінного струму напругою 220 В. Забороняється включати установку без дозволу викладача, торкатися до клем установки.

2. Для зручності фокусування спіралі користуються білим світлом. За високої яскравості світної спіралі можливе тимчасове осліплення очей спостерігача. Тому користуються світлофільтрами.

Обертанням рифленого кільця на окулярі вводиться і виводиться червоний світлофільтр, що зменшує спостережувану яскравість випромінювання спіралі,

При вимірах температур більше 1400°C перемикач діапазонів пірометра необхідно встановлювати в положення «2» ($1200 - 2000^{\circ} \text{C}$). В цьому випадку в оптичну систему приладу вводиться димчастий фільтр, що зменшує спостережувану яскравість випромінювання спіралі,

Порядок виконання роботи

1. Встановити поворотне кільце реостата пірометра в нульове положення.

2. Включити установку і, поступово збільшуючи регулятором напругу, довести температуру спіралі приблизно до $700 - 800^{\circ} \text{C}$ (темно-червоний колір).

3. Навести об'єктив пірометра на розжарену спіраль і домогтися різкого її зображення.
4. Поєднати зображення нитки лампи пірометра із зображенням розжареної спіралі. Обертанням поворотного кільця реостата за годинниковою стрілкою довести розжарення нитки пірометра до такої ж яскравості, як і яскравість спіралі. Записати показання температури за шкалою пірометра і значення струму і напруги на установці зі спіраллю.
4. Під керівництвом викладача збільшити кілька разів (3 - 4 рази) струм розігріву спіралі на 0,5 А, записуючи кожен раз значення температури.

При вимірюванні температури понад 1400 ° С поворотом головки на тубусі пірометра ввести світлофільтр. При цьому видима яскравість спіралі буде меншою. Відповідно пірометр має іншу (нижню шкалу) для високих температур. Показання знімати за нижньою шкалою.

5. Після закінчення вимірювань температури вивести регулятор напруги і реостат пірометра на мінімум напруги, і вимкнути установку.
6. За формулою (4) обчислити сталу Стефана - Больцмана.

Таблиця.

№	I, A	U, B	T, K	T^4	σ_i	$\langle \sigma \rangle$	$\Delta \sigma_i$	$S_{\langle \sigma \rangle}$	$t_{a.n}$	$\Delta \sigma$	$E_{\sigma} \%$
1											
2											
3											

Величина $\Delta \sigma$ обчислюється за стандартною процедурою статистичної обробки даних експерименту. Остаточний результат представити у вигляді

$$\sigma = \langle \sigma \rangle \pm \Delta \sigma, \quad \text{при } \alpha = 0,9.$$

Контрольні питання

1. Яке випромінювання називається тепловим? Які його відмінні властивості?
2. Що називається енергетичною світністю?
3. Що називається поглинальною здатністю тіла?
4. Яке тіло називається абсолютно чорним? Яке тіло називається сірим?
5. Що таке яскравісна температура?
6. Сформулюйте закон Стефана-Больцмана.
7. Які прилади й приналежності використовуються в роботі? У чому полягає принцип дії оптичного пірометра?
8. Розкажіть про вимоги до забезпечення безпеки роботи з установкою.

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. 5. - Хвильова оптика. [Текст]: - Д. НТУ «Дніпровська політехніка», 2020. - 58 с. -

Укладач Гаркуша І.П.