

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА

**ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ В ЗАКОНІ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА ЗА
ДОПОМОГОЮ ОПТИЧНОГО ПРОМЕТРА**

Інструкція до лабораторної роботи

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за природничими і технічними спеціальностями*

Укладачі: І.М.Іванова, Н.О.Якуніна

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2024

УДК 537.8 (075.8)

Ф 48

Укладачі: Іванова Ірина Михайлівна, канд.фіз.-мат. наук, доцент,

Якуніна Наталія Олександрівна, , канд.фіз.-мат. наук, доцент

Рецензент: В.Й Котовський, доктор т.н., професор кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор: С.О Решетняк, доктор фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри загальної фізики КПІ ім. Ігоря Сікорського

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 4 від 01.02.2024 р.)
за поданням Вченої ради фізико-математичного факультету
(протокол № 12 від 20.12. 2023 р.)*

Ф 48 Загальна фізика . ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ В ЗАКОНІ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИЧНОГО ПІРОМЕТРА [Електронний ресурс] інструкція до лабораторної роботи : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за природничими і технічними спеціальностями / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: І.М.Іванова, Н.О.Якуніна. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 26 с.

У навчальному посібнику викладено теоретичні відомості, опис лабораторної роботи з теми «. ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ В ЗАКОНІ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИЧНОГО ПІРОМЕТРА», наведено методичні вказівки до виконання цієї роботи. Посібник призначений для студентів, які навчаються у закладах вищої освіти і вивчають нормативну навчальну дисципліну «Загальна фізика» з циклу математичної та природничо-наукової підготовки за спеціальністю «104. Фізика та астрономія». Посібник може бути корисним для науково-педагогічних працівників, які викладають курс фізики, під час планування та підготовки завдань до лабораторних робіт та модульних контрольних робіт з курсу загальної фізики, а саме її розділу «Фізика атома»

УДК 537.8 (075.8)

Реєстр. № НП 23/24-263. Обсяг 1.18 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024

Лабораторна робота № 3-8 Ф

ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ В ЗАКОНІ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИЧНОГО ПІРОМЕТРА

Мета роботи:

- 1 Експериментально вивчити основні закони теплового випромінювання.
- 2 Ознайомитися з принципом роботи оптичного пірометра.
- 3 Визначити сталу в законі Стефана-Больцмана.
4. Ознайомитися з принципом роботи оптичного пірометра та навчитися користуватись ним для визначення температури розжарених тіл.

Теоретичні відомості

Відомо, що нагріті тіла випромінюють електромагнітні хвилі за рахунок перетворення теплової енергії в енергію випромінювання.

Тепловим випромінюванням називається випромінювання тілами електромагнітної енергії за рахунок їх внутрішньої енергії.

Теплове випромінювання займає особливе місце, оскільки це єдиний вид випромінювання, який може знаходитися в термодинамічній рівновазі з іншими випромінювальними тілами. Для рівноважного випромінювання розподіл енергії між тілом і випромінюванням залишається незмінним для кожної частоти (довжини хвилі). За таких умов втрати енергії тіла на випромінювання компенсуються за рахунок енергії падаючого на нього випромінювання зовнішніх тіл. Тому інтенсивність рівноважного випромінювання залишається незмінною. Температура тіла також лишається незмінною й рівною температурі зовнішніх тіл.

Теплове випромінювання перебуває в тепловій рівновазі з тілом (рівноважне випромінювання), і тому до нього можна застосовувати закони термодинаміки.

Для кількісного опису теплового випромінювання вводяться такі характеристики:

Потік енергії – енергія, що випромінюється з усієї поверхні тіла за одиницю часу:

$$\Phi = \frac{dW}{dt} \quad (1)$$

Кількісною інтегральною характеристикою випромінювання є **енергетична світність R** :

$$R = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{dW}{dS dt} \quad (2)$$

Енергетична світність R – потік енергії, або, що те саме, потужність, яку випромінює тіло за даної температури з одиниці поверхні в усьому інтервалі частот і за всіма напрямками в межах тілесного кута 2π (у середину півсфери).

Енергетична світність є функцією температури, розмірність цієї величини $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Зважаючи на складний механізм теплового випромінювання, воно складається із великої кількості монохроматичних електромагнітних хвиль різної довжини. Весь діапазон довжин таких хвиль називають **спектром випромінювання**. При цьому амплітуди хвиль спектра не зобов'язані бути однаковими. Відомо, що енергія, яка переноситься монохроматичною хвилею, пропорційна квадрату її амплітуди. Відповідно внесок у загальну енергію, що випромінюється тілом, від хвиль різних довжин буде різним. Для того щоб охарактеризувати даний внесок, використовують так звану **випромінювальну здатність, або спектральну густину енергетичної світності**, – величину, яка за даної температури T визначає потік енергії $d\Phi_{\lambda,T}$, що випромінюється з одиниці поверхні тіла в усіх напрямках в одиничному діапазоні довжин хвиль :

$$r_{\lambda,T} = \frac{d\Phi_{\lambda,T}}{dS d\lambda} = \frac{dR_{\lambda,T}}{d\lambda} \quad (3)$$

де $dR_{\lambda,T}$ – енергетична світність тіла в діапазоні довжин хвиль від λ до $\lambda + d\lambda$ за даної температури T . Енергетична світність та випромінювальна здатність знаходяться між собою у такому самому співвідношенні, як маса тіла та його густина, тобто пов'язані очевидним співвідношенням:

$$R = \int_0^{\lambda_{max}} r_{\lambda,T} d\lambda \quad (4)$$

Тіла не лише випромінюють, а й поглинають та відбивають падаюче на них випромінювання. Для того, щоб кількісно охарактеризувати співвідношення між поглинутим та відбитим випромінюванням, вводять спеціальну величину – поглинальну здатність тіла. **Поглинальна здатність, або коефіцієнт чорноти, $a_{\lambda T}$** визначає ту частину падаючого потоку, яка поглинається тілом:

$$a_{\lambda T} = \frac{d\Phi'_{\lambda,T}}{d\Phi_{\lambda,T}} \quad (5)$$

де $d\Phi'_{\lambda,T}$ – величина потоку, що поглинається, із загального потоку $d\Phi_{\lambda,T}$, що падає на тіло. Індокси в (5) вказують на те, що поглинальна здатність (як і випромінювальна здатність $r_{\lambda,T}$) залежить від довжини хвилі падаючого випромінювання та температури тіла. Також $r_{\lambda,T}$ значною мірою залежить від матеріалу, форми та структури поверхні тіла, що опромінюється.

Встановлено, що відношення випромінювальної та поглинальної здатностей не залежить від природи тіла і є для всіх тіл однією й тією самою функцією довжини хвилі та температури

$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda T}} = \phi(\lambda, T) \quad (6)$$

Це твердження становить зміст **закону Кірхгофа**. Він вказує на те, що механізми випромінювання та поглинання електромагнітних хвиль пов'язані та є зворотними один до одного.

Треба підкреслити, що названі характеристики теплового випромінювання залежать від температури, довжини хвилі (крім R) та властивостей речовини тіла. Останнє, зокрема, спричинює те, що поглинальна здатність різних тіл не однаково залежить від довжини хвилі. Цим зумовлені кольори тіл – тіло має колір, якому відповідає довжина хвилі, що поглинається слабше, ніж інші.

Але в теорії провідну роль відіграє модель так званого **абсолютно чорного тіла**. Таким тілом вважають об'єкт, який поглинає все падаюче на нього випромінювання незалежно від діапазону довжин хвиль та температури, для нього $a_{\lambda T} \equiv 1$. Зручність даної моделі в тому, що згідно з (6) випромінювальна здатність для абсолютно чорного тіла є незалежною від його природи.

Зауважимо, що абсолютно чорних тіл у природі не існує. Максимально близькими до них можна вважати тіла з різко неоднорідною поверхнею, яка передбачає багатократне відбивання електромагнітної хвилі. Під час кожного відбивання її енергія буде втрачатися, а ймовірність її повного поглинання пропорційна до кількості відбивань. На сьогодні тілом з найбільшою чорнотою є Vantablack 2, що був знайдений у 2016 році, і має коефіцієнт поглинання 0,9996.

Для багатьох тіл спектр випромінювання є подібним до спектра абсолютно чорного. При цьому поглинальна здатність тіла не залежить від довжини хвилі, тобто $a_{\lambda T} = a_T$. Такі тіла називають **сірими**. Випромінювальна здатність сірого тіла визначається як випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла, помножена на відповідний коефіцієнт чорноти a_T .

Закони теплового випромінювання мають послідовне пояснення в рамках гіпотези про **квантову природу випромінювання**, висунуту М. Планком. Згідно з цією теорією електромагнітне випромінювання відбувається не безперервно, а у вигляді окремих порцій (квантів). При цьому енергія кванта визначається тільки частотою випромінювання:

$$\varepsilon = h\nu \quad (7)$$

де $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка.

Фізичний зміст сталої Планка стає у тому, що вона визначає найменший крок дискретизації енергії, а також є квантом дії, тобто одиницею виміру моменту імпульсу в квантовій механіці.

Енергія, яка випромінюється на даній частоті, буде визначатися кількістю квантів $h\nu$:

$$E = n h\nu \quad (7a)$$

де $n = 1, 2, 3 \dots$ – квантове число.

Грунтуючись на виразі (7), можна показати, що випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла має вигляд:

$$r_{\lambda, T} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1} \quad (8)$$

де c – швидкість світла; k – стала Больцмана.

Вираз (8) називають **формулою Планка**. З формули Планка випливають установлені експериментально ще до створення теорії закони теплового випромінювання абсолютно чорного тіла.

Закон Стефана-Больцмана: енергетична світність абсолютно чорного тіла є прямо пропорційною четвертому степеню температури .

Для того, щоб отримати математичний вираз закону Стефана-Больцмана треба виконати підстановку в (4) виразу (8) та виконати інтегрування:

$$R = \int_0^\infty r_{\lambda, T} d\lambda = \int_0^\infty \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1} d\lambda = \sigma T^4 \quad (9)$$

де $\sigma = \frac{2\pi^2}{15\pi^2 c^2} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$ – стала Стефана-Больцмана.

Слід зазначити, що для сірих тіл поглинальна здатність практично не залежить від довжини хвилі й при заданій температурі T дорівнює сталій величині $a_T < 1$. Тому сіре тіло при кожній температурі має спектр теплового випромінювання такої ж форми, що й АЧТ, але меншу енергетичну світність R :

$$R = a \sigma T^4 \quad (9a)$$

Цей вираз можна розглядати як закон Стефана-Больцмана для сірих тіл. Але слід зауважити, що коли поглинальна здатність тіла залежить від температури ($a_T = f(T)$), то енергетична світність уже не є прямо пропорційною четвертому степеню температури.

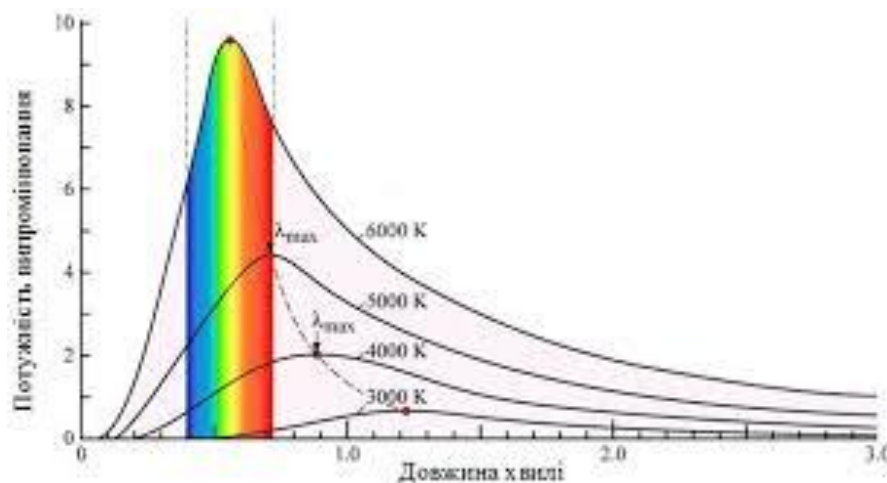


Рис.1. Спектри випромінювання абсолютно чорного тіла

Закон зміщення Віна: довжина хвилі, на якій випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла максимальна, є обернено пропорційною температурі тіла:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (10),$$

де $b = 2,9 \cdot 10^{-8} \text{ м} \cdot \text{К}$ – стала Віна.

Закон Віна теж можна отримати з формули Планка (8), якщо продиференціювати її по λ і прирівняти похідну до нуля. Тоді з отриманого

рівняння виходить:

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{4,965k} \cdot \frac{1}{T} \quad , \quad \text{де} \quad \frac{hc}{4,965k} = b = 2,9 \cdot 10^{-8} \text{ м} \cdot \text{К} .$$

Закон Віна ще називають законом зміщення, бо він показує що, при підвищенні температури максимум випромінювання зсувається в бік коротших хвиль. Проте, навіть при досить високих температурах 1000–2000 К, які використовуються в роботі, тільки незначна частка випромінювання потрапляє у видиму область ($\lambda < 0,8$ мкм), як це добре видно з рис.1.)

Закон Кірхгофа: відношення випромінювальної здатності тіла до його поглинальної здатності – це універсальна функція частоти та температури тіла, яка дорівнює випромінювальній здатності абсолютно чорного тіла при тій же температурі.

Закон Кірхгофа випливає з того, що у стані термодинамічної рівноваги в системі різні тіла випромінюють і поглинають різні енергії, але кожне окреме тіло при заданій температурі T у будь-якому інтервалі довжин хвилі $d\lambda$ повинно випромінювати стільки енергії, скільки воно поглинає в цьому інтервалі.

Закони теплового випромінювання використовуються для виміру температури розпечених і самосвітних тіл (наприклад, зірок). Методи виміру високих температур, що використовують залежність спектральної щільності енергетичної світності або інтегральної енергетичної світності тіл від температури, називають оптичною пірометрією. Прилади для виміру температури нагрітих тіл за інтенсивністю їхнього теплового випромінювання в оптичному діапазоні спектра називають пірометрами. Залежно від того, який із законів теплового випромінювання покладено в основу методу вимірювання температур, розрізняють три умовних температури: ***енергетичну або радіаційну, яскравісну та кольорову.*** Вони функціонально зв'язані зі справжньою температурою тіла і його випромінювальною здатністю.

Під **радіаційною температурою** розуміють температуру абсолютно чорного тіла, при якій його випромінювальна здатність однакова з випромінювальною здатністю тіла, температуру якого визначають.

Яскравісною температурою називають температуру абсолютно чорного тіла, при якій його спектральна випромінювальна здатність $r_{\lambda,T}$ дорівнює спектральній випромінювальній здатності досліджуваного тіла для тієї самої довжини хвилі.

Під **кольоровою температурою** розуміють температуру абсолютно чорного тіла, при якій спектральний склад його випромінювання однаковий із спектральним складом досліджуваного тіла, тобто відношення спектральних випромінювальних здатностей для двох заданих довжин хвиль однакові.

Експериментальна установка та методика вимірювання температури

Закон Стефана-Больцмана покладений в основу зручного способу визначення температур тіл. Енергетична світність є величиною, яку достатньо легко вимірювати за допомогою технічних засобів.

У даній роботі для вимірювання температури використовується пірометр (додаток 1). За його допомогою вимірюється так звана яскравісна температура.

Принцип роботи пірометра вимірювання полягає у візуальному порівнянні яскравості досліджуваного світлого тіла та еталонного (нитка розжарювання пірометричної лампи), яке приймається за абсолютно чорного тіла (безконтактний метод вимірювання температури). При цьому використано властивість людського ока з високою точністю порівнювати яскравість двох тіл, які розміщені поруч. Змінюючи температуру нитки пірометричної лампи, домагаються вирівнювання її яскравості з яскравістю досліджуваного тіла.

Даний безконтактний спосіб вимірювання має ряд суттєвих переваг. Так, за надто високих температур контактні методи є неприйнятними, оскільки вимірювальні засоби будуть руйнуватися в процесі вимірювання. Крім того, контактним способом неможливо визначити температуру недосяжних об'єктів (наприклад, небесних тіл).

Пірометр складається з зорової труби, всередині якої змонтовано еталонну фотометричну лампу. В якості досліджуваного тіла в даній роботі

використовується вольфрамова спіраль фотометричної лампи розжарювання, струм через яку можна задавати за допомогою блока живлення (рис. 2).



Рис. 2. Зовнішній вигляд лабораторної установки

За допомогою об'єктива на фоні тіла, температура якого підлягає вимірюванню, спостерігач може бачити також і еталонну дугу. Зміною опору реостата яскравість свічення дуги прирівнюється до яскравості свічення досліджуваного тіла. Шкала при цьому вкаже його температуру.

Опис експерименту

В даній лабораторній роботі досліджується залежність від температури

потужності теплового випромінювання лампи розжарювання з вольфрамовою спіраллю.

Вольфрам можна вважати сірим тілом, для якого виконується закон (9а).

Коли лампа не горить, і температура спіралі дорівнює температурі навколишнього середовища ($T = T_c$), теплове випромінювання спіралі є рівноважним. Через це потік енергії, що поглинається спіраллю дорівнює випромінюваному потоку, і, згідно з (7) та (9а), визначається виразом

$$\Phi_{i\tilde{a}} = SR = Sa_T \sigma T^4$$

де S – площа випромінюючої поверхні.

При цьому спіраль практично не випромінює у видимій області спектра. Але при пропусканні струму I спіраль нагрівається до високої температури $T \gg T_c$, і, згідно (2) випромінюваний нею потік

$$\Phi_{a\tilde{e}i} = Sa_0 \sigma T^4$$

сильно зростає, причому помітна його частка потрапляє у видиму область. Однак, величина Φ_{nog} не змінюється, тому що температура в лабораторії T_c практично залишається постійною, й інтенсивність теплового випромінювання навколишніх тіл не змінюється. За таких умов випромінювання спіралі є не рівноважним, але стаціонарним, оскільки втрати енергії на випромінювання компенсуються тепловою потужністю струму $P = IU$, що виділяється в спіралі. Отже,

$$\Phi_{\text{вип}} = \Phi_{\text{пог}} + IU$$

Коли лампа горить, то $T \gg T_c$, $\Phi_{\text{вип}} \gg \Phi_{\text{пог}}$ і $\Phi_{\text{пог}} \ll IU$. Тому можна вважати, що

$$P = UI = Sa_0 \sigma T^4 \quad (11)$$

де I , U – сила струму в лампі та напруга на ній.

Вираз (11) дозволяє перевірити виконання закону Стефана-Больцмана для сірих тіл у такий спосіб:

1. Маючи площу випромінюючої поверхні S і табличні дані для поглинальної здатності спіралі $a_T(T)$, і, вимірюючи I та U , можна визначити сталу Стефана-Больцмана:

$$\sigma = \frac{P}{Sa_0 T^4} \quad (12)$$

і порівняти його з теоретичним значенням .

2. Перевірити виконання закону $R \sim T^4$ можна, проаналізувавши експериментально отриману залежність (6). Якщо подати її у вигляді

$$P = Sa_0 \sigma T^n \quad (13)$$

то можна записати: $\lg\left(\frac{P}{a_T}\right) = \lg(\sigma S) + n \lg(T)$.

Отже, залежність

$$\lg\left(\frac{P}{a_T}\right) = f(\lg(T))$$

є лінійною залежністю з кутовим коефіцієнтом n . Тому величину n можна визначити, побудувавши за експериментальними даними графік цієї функції, а, порівнявши отриманий результат із теоретичним значенням $n = 4$, зробити висновок про застосовність закону (9а) для вольфраму.

Як було сказано, принцип вимірювання температури, що використовується в цій роботі, полягає у візуальному порівнянні яскравості досліджуваного тіла (спіраль досліджуваної лампи) із яскравістю еталонного тіла (нитка розжарення еталонної лампи всередині пірометра), яке можна вважати абсолютно чорним тілом. Змінюючи струм в еталонній лампі, отже, її температуру $T = T_{\text{acht}}$, яку можна зняти зі шкали пірометра, домагаються візуального вирівнювання яскравостей нитки пірометричної лампи та досліджуваної спіралі.

Співставлення яскравостей робиться у вузькому інтервалі довжин хвиль, який виділяється червоним світлофільтром ($\lambda_0 \cong 0,66$ мкм). За таких умов

яскравість є пропорційною до випромінювальної здатності на заданій довжині хвилі $r(\lambda_0)$.

Температура абсолютно чорного тіла $T_{\text{ачт}}$, при якій його яскравість дорівнює яскравості досліджуваного тіла, називається *яскравісною температурою* $T_{\text{я}}$. Отже, пірометр дає яскравісну температуру $T_{\text{я}}$ спіралі досліджуваної лампи. Але ця температура не співпадає з абсолютною температурою T досліджуваної спіралі, котра фігурує у виразах законів теплового випромінювання. У момент вимірювання абсолютна температура нитки еталонної лампи дорівнює $T_{\text{я}}$, і, якщо позначити абсолютну температуру досліджуваної спіралі T , то з рівності випромінювальних здатностей ламп і виразу (6) випливає що

$$r_{\text{ачт}}(\lambda_0, T_{\text{я}}) = a_{\text{т}} r_{\text{ачт}}(\lambda_0, T) \quad (14)$$

Оскільки для сірого тіла, яким є досліджувана спіраль, $a_{\text{т}} < 1$, то $T > T_{\text{я}}$, і можна записати:

$$T = T_{\text{я}} + \Delta T \quad (15)$$

де ΔT – поправка до показів пірометра, яку для кожного значення $T_{\text{я}}$ можна розрахувати .

Зв'язок між T_{λ} і T можна отримати, використовуючи закон Кірхгофа (6) та формулу Планка (8):

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

$$\text{при } \frac{hc}{\lambda} \gg kT, \quad a_{\lambda T} e^{-\frac{hc}{\lambda kT}} \cong e^{-\frac{hc}{\lambda kT_{\lambda}}}.$$

$$\text{Звідки отримуємо} \quad \ln a_{\lambda T} = \frac{hc}{\lambda k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\lambda}} \right) \approx -\frac{hc}{\lambda k T_{\lambda}} \frac{\Delta T}{T_{\lambda}^2},$$

$$\text{де } \Delta T = T - T_{\lambda}, \text{ та } T = T_{\lambda} + \Delta T;$$

$$\Delta T \approx \frac{\lambda k}{hc} \ln a_{\lambda T} T_{\lambda}^2.$$

Оскільки $\ln a_{\lambda T} < 0$, то $\Delta T > 0$.

Знаючи $a_{\lambda T}$ для даного тіла, за яскравісною температурою T_{λ} можна визначити його термодинамічну температуру.

Результат такого розрахунку у вигляді графіка $\Delta T = f(T_{\lambda})$ поданий на робочому місці, що дозволяє за формулою (10) визначати термодинамічну температуру досліджуваної спіралі через результати прямих вимірів T_{λ} .

Порядок виконання роботи.

1. Відповідно до інструкції на робочому місці увімкнути установку й налаштувати пірометр.

Таблиця 1

№ з/п	I, A	U, B	P, Bt	$t_{\lambda}, ^{\circ}C$	T_{λ}, K	$\Delta T, K$	T, K	a_T	$\sigma, \frac{Bt}{m^2 K^4}$	$lg T$	$lg(\frac{P}{a_T})$
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

2. За допомогою регулятора на блоці живлення встановити струм у досліджуваній лампі, при якому з'являється її світіння, й виміряти яскравісну температуру $t_{\lambda}^{\circ}C$.

Величину струму I , напруги U та температури t_{λ} занести до табл. 1.

3. Поступово збільшуючи напругу та струм, виконати виміри п. 2 ще 7 – 10 разів у всьому діапазоні пірометра й занести їх результати до табл. 1.

Примітка. В області $t_{\text{я}} = 1200 \div 1400$ °С у 2 – 3 точках виміри провести два виміри – без, та з димчастим фільтром, – і в колонку $t_{\text{я}}$ табл. 1 занести середні значення з кожної пари вимірів.

4. Для кожного виміру обчислити значення $T_{\text{я}} = (t_{\text{я}} + 273)$ К і занести в таблицю 1.

5. За графіком (додаток 2) $\Delta T(T_{\text{я}})$ для кожного значення $T_{\text{я}}$ визначити поправку ΔT і занести її до таблицю 1.

6. Обчислити термодинамічну температуру T К і теж занести до таблицю 1.

7. За наведеними в додатку 3 даними для поглинальної здатності вольфраму заповнити табл. 2.

Табл. 2

T										
$a_{\text{т}}$										

Обробка результатів

1. Розрахувати й занести в таблицю 1 значення потужності P .

2. Використовуючи значення $a_{\text{т}}$ із табл. 2, побудувати на міліметровому папері графік залежності $a_{\text{т}}(T)$, за яким визначити та занести до табл. 1 величину $a_{\text{т}}$ для всіх значень температури T з табл. 1.

3. Використовуючи дані табл. 1 і вказану на робочому місці величину площі випромінюючої поверхні S , за формулою (12) для кожної температури розрахувати значення сталої Стефана-Больцмана σ , і занести результати до таблиці 1.

4. Обчислити середнє значення σ і подати його в протоколі роботи :

$$\langle \sigma \rangle =$$

5. Розрахувати значення $\lg T$ й $\lg \left(\frac{P}{a_{\text{т}}} \right)$ і занести їх до таблиці 1.

6. На міліметровому папері побудувати графік залежності $\lg\left(\frac{P}{a_r}\right) = f(\lg T)$, по ньому визначити показник степеня n у виразі (8), як $n = \frac{\Delta \lg(P/a_r)}{\Delta \lg T}$.

7. Навести результат у протоколі роботи:

$n =$

8. Зробити висновок про виконання закону Стефана-Больцмана для вольфраму та про причини можливого відхилення від нього.

Контрольні запитання

1. Що називається тепловим випромінюванням?
2. Дати означення понять “енергетична світність” та “випромінювальна здатність” тіла. Який існує зв'язок між ними?
3. Що називається поглинальною здатністю тіла? Що таке абсолютно чорне тіло? Сіре тіло?
4. Сформулюйте закон Кірхгофа.
5. На яких уявленнях про випромінювання ґрунтується формула Планка (3)?
6. Як із формули Планка (3) можна одержати закон зміщення Віна?
7. Як із формули Планка (3) можна одержати закон Стефана-Больцмана?
8. Як записується закон Стефана-Больцмана для сірого тіла?
9. Пояснити принцип роботи оптичного пірометра, що використовується в роботі.
10. Що називається яскравісною температурою тіла? Чому та як вона відрізняється від термодинамічної температури тіла?
11. Чи може яскравісна температура залежати від довжини хвилі пропускання світлофільтра, що використовується в пірометрі: а) узагалі і б) у даній роботі?
12. Випромінювання розжареної спіралі досліджуваної лампи не є рівноважним. Тоді, чому воно має задовольняти закону Стефана-Больцмана?

13. Поясніть, як у роботі визначається стала Стефана-Больцмана?
14. Поясніть, як у роботі визначається показник степеня n в законі (8).
15. Проаналізуйте можливі причини відхилення знайденої величини показника степеня n у температурній залежності $R(T)$ вольфраму від значення (4).

Література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., “Загальний курс фізики”, т. 3, §§ 11.1 – 11.4, “Техніка”, К, – 1999 р.
2. Квантова фізика.: метод. вказівки до виконання лаборатороторних робіт для студентів денної форми навчання /Уклад.: В. П. Бригінець, О. О. Гусєва, І. В. Лінчевський , Н.О Якуніна. – К.: НТУУ «КПІ», 2009, 60 с.

Додаток 1.

Принцип роботи пірометра

У фізиці високі температури зручно вимірювати за допомогою безконтактних засобів. Зокрема, пірометр дає можливість експериментально визначати такі температури. Дія пірометрів заснована на залежності теплового випромінювання нагрітих тіл від їхньої температури і фізико-хімічних властивостей. На відміну від термометрів первинний перетворювач пірометра не підпадає під вплив високої температури і не змінює температурне поле, тому що перебуває поза вимірювальним середовищем. З підвищенням температури нагрітого тіла інтенсивність його теплового випромінювання у вигляді електромагнітних хвиль різної довжини швидко зростає. При нагріванні до 500°C тіло випромінює невидимі інфрачервоні промені великої довжини хвилі, однак подальше збільшення температури викликає появу видимих променів меншої довжини, завдяки яким тіло починає світитися. Спочатку розпечене тіло має темно-червоні кольори, що у міру росту температури і появи променів, що поступово зменшуються за довжиною хвилі, переходить у червоний, жовтогарячий, жовтий і, нарешті, білі кольори, що складається з комплексу променів різної довжини хвилі. Одночасно зі збільшенням температури нагрітого тіла і зміною його кольору сильно зростає інтенсивність часткового (монохроматичного або одноколірного) випромінювання (яскравість) для даної ефективної довжини хвилі, а також помітно збільшується інтенсивність сумарного випромінювання тілом енергії, що дозволяє використовувати ці властивості для вимірювання температури нагрітих тіл. Різні фізичні тіла, що нагріті до однієї і тієї ж температури, мають неоднакові часткову і сумарну інтенсивності випромінювання і мають різні коефіцієнти поглинання, що представляють собою відношення енергії, поглиненої тілом, до енергії, що падає на тіло. Найбільшу здатність випромінювання і поглинання енергії має так назване абсолютно чорне тіло, у природі не існуюче, що представляє собою уявлюваний ідеальний випромінювач. Це тіло поглинає всі падаючі на

нього промені, тобто має коефіцієнт поглинання, що дорівнює одиниці, і має найбільшу інтенсивність випромінювання. Фізичні тіла мають здатність відбивати частину падаючих на них променів і, отже, завжди мають коефіцієнт поглинання менше одиниці. Інтенсивність випромінювання і коефіцієнт поглинання при даній температурі залежать від складу речовини і стану його поверхні. Тіло, що має темну і шорсткувату поверхню, ближче по своїх властивостях до чорного тіла, чим тіло зі світлою і полірованою поверхнею. У цьому зв'язку шкалу пірометра доводиться градуювати по випромінюванню чорного тіла. Тому що випромінювальна здатність реальних тіл менше, ніж чорних тіл, то показання пірометра будуть відповідати не дійсній температурі реального тіла, а дають умовну температуру або, у цьому випадку, так називану температуру яскравості. Пірометри, що вимірюють температуру яскравості по спектральній яскравості у видимій частині спектра, називають оптичними візуальними пірометрами.

Прилади, що вимірюють температуру за значенням відносини енергетичних яскравостей у двох спектральних інтервалах, називають колірними пірометрами або пірометрами спектрального відношення .

Оптичні пірометри широко застосовуються в лабораторних і виробничих умовах для вимірювання температур вище 800°C . Принцип дії оптичних пірометрів заснований на порівнянні спектральної яскравості тіла зі спектральною яскравістю градуйованого джерела випромінювання. Як чутливий елемент, що визначає збіг спектральних яскравостей у візуальних оптичних пірометрах, служать очі людини.

Найпоширенішим є оптичний пірометр зі зникаючою ниткою, схема якого наведена на рис. 4. Випромінювання від контрольованого об'єкта 1 за допомогою лінзи 2 об'єктива фокусується в площині нитки розжарювання пірометричної лампи 5.

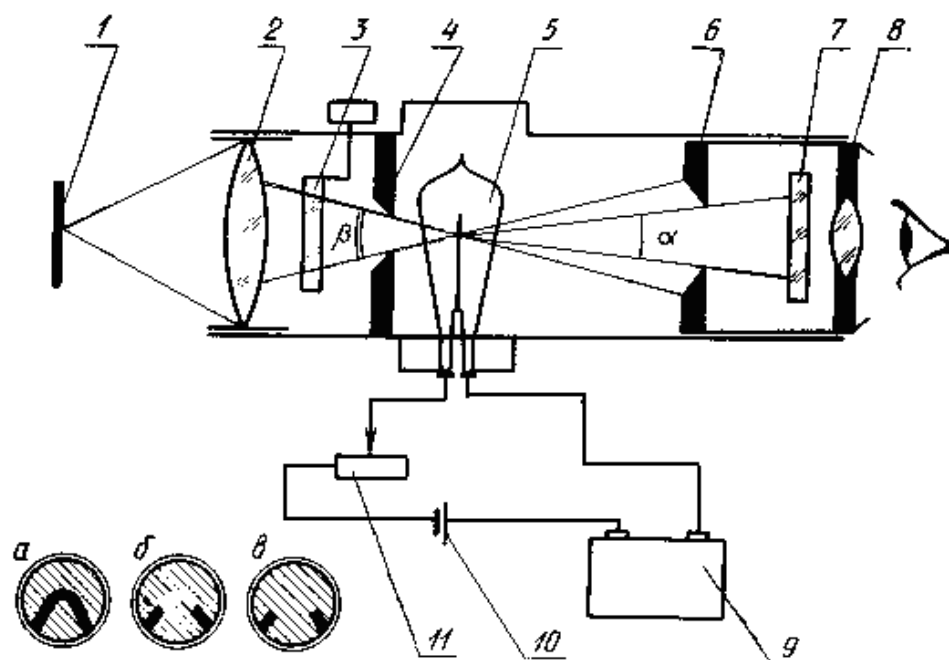


Рис. 4 Принципова схема пірометра (пірометр зі зникаючою ниткою)

Спостерігаючи через окуляр 8 і червоний світлофільтр 7, оператор бачить нитку розжарювання лампи на тлі зображення контрольованого об'єкта. Пірометрична лампа включена в електричний ланцюг, що складається з джерела струму 10, реостата 11, реєструючого приладу 9. Змінюючи реостатом силу струму, що проходить через пірометричну лампу, оператор плавно змінює яскравість нитки лампи.

Якщо яскрава температура нитки нижче за яскравість температури об'єкта, то нитка видно темною на тлі об'єкта (рис. 4 а); якщо температура нитки вище температури об'єкта, то нитка яскравіша за об'єкт (рис. 4 б).

При рівності її видимої яскравості з яскравістю контрольованого об'єкта нитка лампи і натомість зображення випромінювача не видно (рис. 4 в), що свідчить про рівність їхньої яскравості. Визначивши заздалегідь залежність між силою струму, що проходить через лампочку, і останньою яскравістю температурою за показаннями реєструючого приладу, знаходять яскраву температуру вимірюваного тіла.

Джерело світла й пірометр установлені на оптичній лаві й підключені до блоку живлення.

Об'єктив пірометра встановлюють так, щоби зображення об'єкта (спіраль досліджуваної лампи) накладалося на нитку розжарення пірометричної лампи. Яскравість зображення спіралі, створюваного об'єктивом, дорівнює яскравості самої спіралі. Яскравість пірометричної лампи регулюється зміною струму розжарення за допомогою реостата 6 поворотом барабана .

Порівняння спектральних яскравостей об'єкта вимірювання і нитки лампи здійснюються звичайно при довжині хвилі рівної $0,65\text{ мкм}$, для чого перед окуляром установлений червоний світлофільтр 6. Вибір червоного світлофільтра обумовлений тим, що око людини сприймає через цей фільтр тільки частину спектра його пропущення, що наближається до монохроматичного променя. Крім того, застосування червоного світлофільтра дозволяє знизити нижню межу вимірювання пірометра.

Поступово збільшуючи розжарення, яскравість пірометричної лампи змінюють доти, поки вона не зрівняється з яскравістю зображення спіралі досліджуваної лампи, і знімають покази зі шкали пірометра, що проградуїрована в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$). При досягненні зазначеної рівності нитка «зникає» на фоні зображення об'єкта вимірювання (рис.5). У цей момент по шкалі міліамперметра, попередньо градуированого в значеннях температури яскравості нитки лампи, визначають яскравісну температуру об'єкта. По вимірюваній яскравісній температурі і відповідних значень розраховують істинну температуру об'єкта.



Рис. 5. При досягненні рівності яскравостей вершина нитки розжарення пірометричної лампи перестає розрізнятися на тлі спіралі досліджуваної лампи.

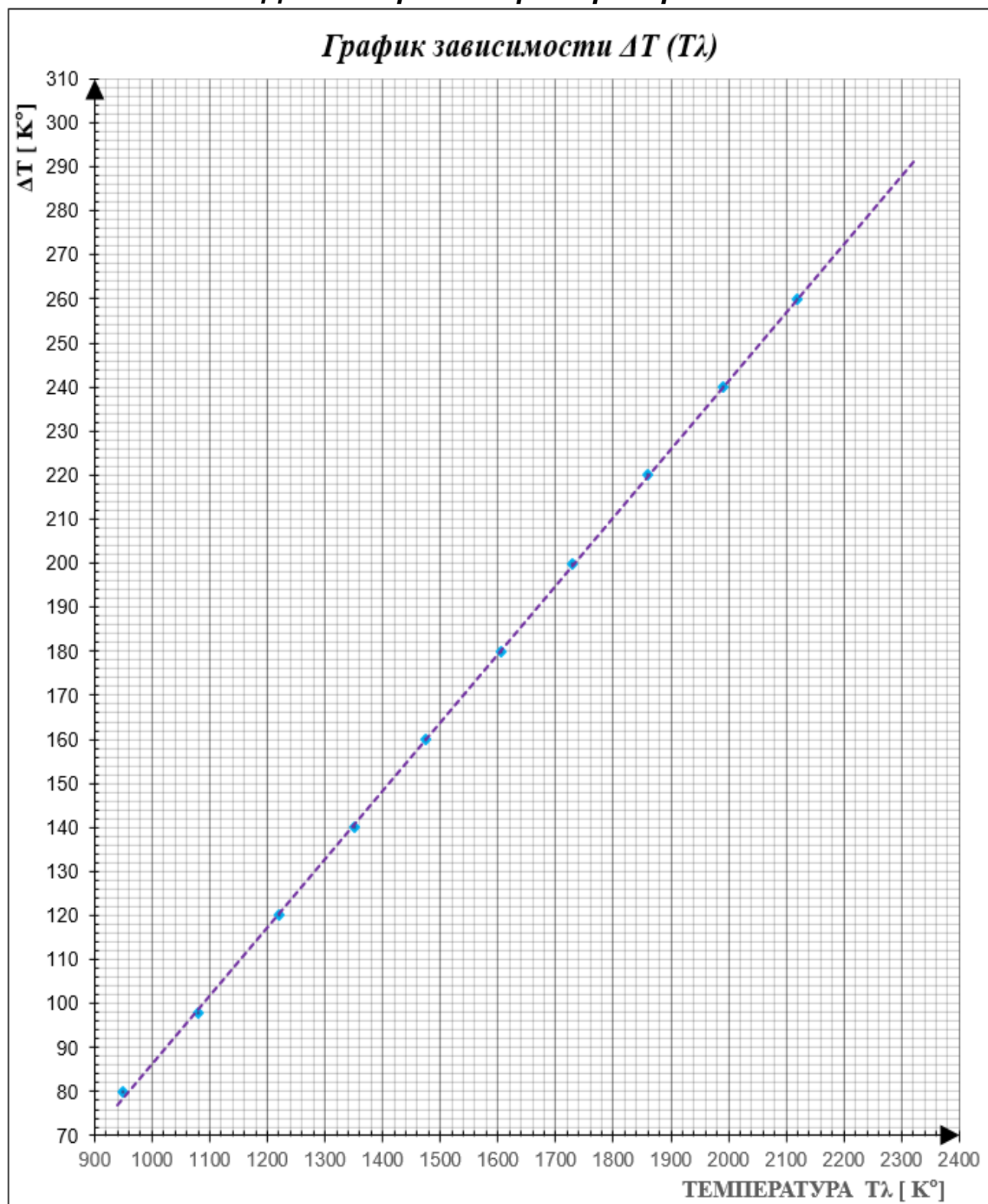
Для розширення діапазону вимірюваних температур використовується нейтральний (димчастий) світлофільтр, який послаблює яскравість досліджуваного тіла і застосовується, коли температура перевищує 1400 °С. Відповідно, пірометр має дві шкали: 700÷1400 °С при роботі без димчастого фільтра, і 1200÷2000 °С для роботи з фільтром.

Звичайно в оптичних пірометрах є дві шкали, однією з яких користуються при не встановленому поглинаючому світлофільтрі, наприклад від 800 до 1200°С, а другий — при встановленому світлофільтрі від 1200 до 2000°С.

Існуючі в цей час оптичні пірометри призначені для вимірювання температур в інтервалі від 800 до 6000°С и мають різні модифікації з різними межами вимірювання. Клас точності оптичних пірометрів 1,5-4,0.

Додаток 2.

Дані вимірів лабораторної роботи №3-8



Додаток 3

