

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Приазовський державний технічний університет»
Кафедра фізики

Тютюнников В.І.

ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ ТЕПЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи № 81
по курсу «Фізика»
для студентів усіх спеціальностей
всіх форм навчання

Маріуполь
2020

УДК 535.23(077)

Вивчення законів теплового випромінювання [Електронний ресурс] : Методичні вказівки по виконанню лабораторної роботи №81 з курсу "Фізика" для студентів усіх спеціальностей всіх форм навчання /Укл. Тютюнников В.І. - Маріуполь, ПДТУ, 2020 - 14с. Режим доступу:

Містять основні визначення і теоретичні положення по тепловому випромінюванню, методику визначення показника ступеня в залежності потужності теплового випромінювання вольфраму від температури, опис оптичного пірометра ОППР - 017 для вимірювання температури високо нагрітих тел.

Укладач

доц. Тютюнников В.І.

Рецензент

доц. Цветкова О.В.

Затверджено

на засіданні кафедри фізики,
протокол №16 від 20 травня 2020 р.

Затверджено

на засіданні методичної комісії
факультету інформаційних технологій,
протокол №11 від 6 червня 2020 р.

©ДВНЗ «ПДТУ», 2020

©В.І. Тютюнников , 2020

ВСТУП

«Випромінювання абсолютно чорного тіла» один з важливих розділів курсу фізики, який є фундаментом в розумінні основ квантової фізики. Виконання даної роботи буде сприяти більш глибокому розумінню матеріалу при вивченні процесів випромінювання з поверхні твердого тіла, і розумінні впливу температури тіла на його спектральні властивості.

1 ЦІЛЬ РОБОТИ

На практиці експериментально перевірити теоретичні висновки про залежність потужності випромінювання вольфраму від температури. Визначити діапазон довжин хвиль, які випромінює вольфрамова спіраль лампи розжарювання. Вивчити роботу оптичного пірометра

Вказівки з підготовки до роботи: опрацюйте дане керівництво; вивчіть лекційний матеріал по темі «Випромінювання абсолютно чорного тіла»; дайте відповідь на контрольні питання.

2 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Тепловим випромінюванням називається електромагнітне випромінювання нагрітих тіл в умовах термодинамічної рівноваги. Всі розпечені тверді і рідкі тіла дають суцільний спектр випромінювання. Інтенсивність випромінювання і спектральний склад залежать від температури, хімічної природи і агрегатного стану тіл. Теплове випромінювання тіл відрізняється від інших видів випромінювання тим, що може перебувати в рівновазі з випромінювачем. При рівновазі тіло випромінює і поглинає в одиницю часу рівну кількість енергії і його температура залишається постійною.

Теплове випромінювання характеризується двома основними величинами:

1. Енергетична світність тіла (R_T) – це відношення потоку випромінювання, що випускається тілом, до площі S поверхні випромінювача:

$$R_T = d\Phi/dS, \quad (\text{Вт/м}^2), \quad (2.1)$$

де Φ – потік випромінювання, що є відношенням енергії випромінювання до часу t , за яке воно сталося.

2. **Спектральна густина енергетичної світності** – чисельно дорівнює потужності випромінювання з одиниці площі поверхні цього тіла в інтервалі довжин хвиль від λ до $\lambda + d\lambda$; ця характеристика для даного тіла залежить від довжини хвилі і від його температури T :

$$r_{\lambda,T} = \frac{dR_T}{d\lambda}, \quad (\text{Вт/м}^3). \quad (2.2)$$

Знаючи спектральну густину енергетичної світності, можна обчислити **інтегральну енергетичну світність**:

$$R_t = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda. \quad (2.3)$$

Якщо тіло при деякій температурі і в вузькому інтервалі довжин хвиль поглинає не всю падаючу на нього енергію, а тільки її частину, то вводять величину $\alpha_{\lambda,T}$, що називається поглинальною здатністю тіла. **Поглиналина здатність** тіла (коефіцієнт поглинання) дорівнює відношенню потоку енергії, який поглинається тілом, до потоку, що падає, у вузькому інтервалі довжин хвиль від λ до $\lambda + d\lambda$ при температурі T .

Тіло, яке поглинає все падаюче на нього випромінювання, називають абсолютно чорним тілом:

$$a_{\lambda,T} = 1$$

У природі не існує абсолютно чорних тіл, які поглинали б падаюче на них випромінювання повністю, тобто для реальних тіл коефіцієнт поглинання менше одиниці і залежить від довжини хвилі, температури, хімічного складу тіла, стану його

поверхні. Тому на практиці використовують модель чорного тіла. Ідеальною моделлю чорного тіла є замкнута порожнина з невеликим отвором. Промінь світла, що потрапив в середину такої порожнини, зазнає поглинання і багаторазове відбиття від стінок, в результаті чого інтенсивність випромінювання, яке вийшло, виявляється практично рівною нулю.

Тіла, поглинальна здатність яких менше одиниці, але однакова для всіх частот, називають сірими тілами. До них, в першому наближенні, відносять всі метали, в тому числі і вольфрам.

У 1859 році Г. Кірхгофом було встановлено, що відношення випромінювальної здатності всіх тіл до їх проміневопоглинальної здатності не залежить від матеріалу цих тіл і дорівнює випромінювальній здатності абсолютно чорного тіла $\phi_{\lambda,T}$, що є функцією тільки температури і довжини хвилі (частоти):

$$\phi_{\lambda,T} = \frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}}$$

(2.4)

Ця функція називається функцією Кірхгофа, а вираз (2.4) являє собою закон Кірхгофа в диференціальній формі. Експериментальні криві залежності випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла від довжини хвилі для різних температур наведені на рис.1.

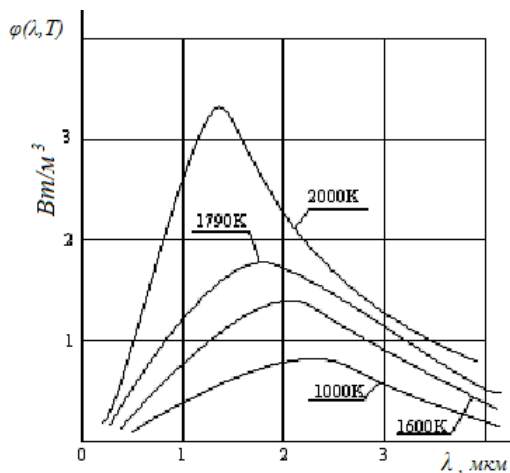


Рисунок 1 – Графіки залежності випромінюваль-ної здатності абсолютно чорного тіла від довжини хвилі

Для кожної температури існує така довжина хвилі λ_{max} , на яку припадає найбільша частина енергії, що випускається абсолютно чорним тілом. Зі збільшенням температури максимум енергетичної світності чорного тіла зміщується в область більш коротких довжин хвиль (закон зміщення Віна):

$$\lambda_{max}=C'/T \quad (2.5)$$

де $C'=2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постійна Віна.

Відповідно до рівняння (2.3) площа під кривою дорівнює інтегральній світності абсолютно чорного тіла при відповідній температурі.

Аналітичний вид залежності випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла $r_{\lambda,T}$ від довжини хвилі λ і температури T був знайдений Планком на основі висунутої ним гіпотези про те, що світло випромінюється тілами окремими порціями – квантами. Енергія кожної такої порції:

$$\varepsilon = \hbar\omega, \quad \text{або} \quad \varepsilon = h\nu,$$

де $h=6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постійна Планка, $\hbar=h/2\pi$,

ν – частота,

ω – кругова частота.

Формула Планка:

$$r_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (2.6)$$

де $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – швидкість світла у вакуумі;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постійна Больцмана.

Інтегруючи функцію Планка по всьому спектру випромінювання, визначемо що енергетична світність абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому ступеню його

абсолютної температури. Для цього використовуючи (2.3) і (2.6) маємо:

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda = 2\pi hc^2 \int_0^{\infty} \frac{1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} d\lambda \quad (2.7)$$

$$x = \frac{hc}{\lambda kT}$$

Введемо замість змінної λ нову змінну:

Тоді вираз (2.7) набуде вигляду:

$$R_T = \frac{2\pi hc^2}{(hc/k)^4} T^4 \int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \quad (2.8)$$

У вираз входить визначений інтеграл:

$$\int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx = 6,498 \quad \text{та множник} \quad \frac{2\pi hc^2}{(hc/k)^4}$$

Якщо позначити добуток всіх постійних множників через σ , то підтвердемо аналітичний закон Стефана-Больцмана:

$$R = \sigma T^4, \quad (2.9)$$

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

Якщо формулу Планка досліджувати на максимум, то отримаємо закон зміщення Віна (2.5).

Закони теплового випромінювання використовуються для вимірювання температури розжарених і випромінюючих тіл (наприклад, зірок). Методи вимірювання високих температур, які використовують залежність спектральної густини енергетичної світності або інтегральної енергетичної світності тіл від температури, називаються оптичною пірометрією. Прилади для вимірювання температури нагрітих тіл по інтенсивності їх теплового випромінювання в оптичному діапазоні спектра називаються пірометрами.

У даній роботі використовується яркісний пірометр зі зникаючою ниткою. Напруження нитки пірометра підбирається

таким чином, щоб зображення нитки пірометра ставало нерозрізненим на фоні поверхні розпеченого тіла, тобто нитка як би «зникає». Використовуючи проградуйований по випромінюванню чорного тіла міліамперметр, можна визначити яркісну температуру.

Розглянуті закономірності випромінювання абсолютно чорного тіла якісно справедливі і для тіл, які не є абсолютно чорними. Експериментально встановлено, що при високих температурах випромінювання металу наближається до випромінювання абсолютно чорного тіла і енергетична світність його в інтервалі температур виражається формулою:

$$R_T = bT^n, \quad (2.10)$$

де b і n – експериментальні параметри, що залежать від фізичних властивостей даного металу і ступеня його чорноти.

У даній лабораторній роботі досліджується теплове випромінювання вольфрамової спіралі лампи розжарювання. При високій температурі потужність, яка підводиться до лампи розжарювання, майже повністю витрачається на випромінювання, тобто:

$$P = CT^n,$$

де C – коефіцієнт, що враховує площу спіралі, її фізичні властивості і ступінь розсіювання енергії в простір.

Логарифмуючи останню формулу, отримуємо рівняння:

$$\ln P = \ln C + n \ln T,$$

яке в функціональній шкалі $\ln P = f(\ln T)$ представляє пряму лінію. Побудувавши графічно знайдену в експерименті залежність $\ln P$ від $\ln T$, можна знайти параметр n , як тангенс кута нахилу отримуваної прямої до вісі абсцис.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Прилади й приладдя:

- оптичний пірометр зі "зникаючою" ниткою ОППІР-017;
- джерело випромінювання – вольфрамова спіраль лампи розжарювання;
- автотрансформатор;
- вольтметр;
- амперметр.

Схема експериментальної установки наведена на рис.2.

Лампа розжарювання N з вольфрамовою спіраллю включена у вторинну обмотку трансформатора Tr , за допомогою якого можна змінювати напругу, яка до неї підводиться.

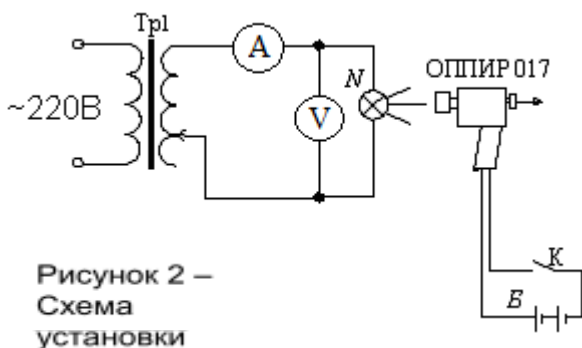


Рисунок 2 –
Схема
установки

Потужність, яку споживає лампа, можна визначити за формулою

$$P=IU,$$

де I – сила струму в колі, яка вимірюється амперметром;

U – напруга на лампочці, яка вимірюється вольтметром.

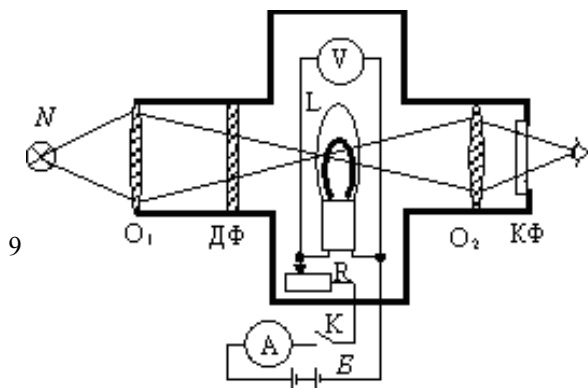


Рисунок 3 – Схема пірометра

Температуру розпеченої спіралі вимірюють оптичним пірометром зі "зникаючою" ниткою ОППІР-017. Визначення температури зводиться до порівняння яркостей випромінювань досліджуваного джерела і проградуйованного еталона нитки розжарювання пірометричної лампочки L . Схема пірометра зображена на рис.3. За допомогою об'єктива O_1 отримуємо зображення поверхні спіралі лампи розжарювання N , температуру якої потрібно виміряти, на тлі спіралі пірометричної лампи розжарювання L . Лінза окуляра O_2 служить для збільшення отриманого зображення і встановлюється так, щоб спостерігач бачив чітке зображення спіралей. Лампа L живиться від джерела струму B , через реостат R . Регулюючи реостатом R величину струму в лампі L , можна домогтися зникнення видимості її нитки на тлі зображення спіралі лампи розжарювання N . В цьому випадку яскраві температури ($Tя$) спіралі лампи L і спіралі лампи розжарювання N збігаються. Порівняння яскравості відбувається в обмеженій області спектра, тому для отримання монохроматичного випромінювання в трубці окуляра O_2 поміщений червоний світлофільтр $K\Phi$. Для збільшення терміну служби пірометричної лампи L , температура її нитки не повинна перевищувати 1400°C . При вимірі більш високих температур на шляху променів між лінзою об'єктива O_1 і лампою L за допомогою відповідної рукоятки вводиться поглинальне скло $Д\Phi$.

Вольтметр пірометра проградуйований в градусах Цельсія і має шкалу з двома межами $800-1200^{\circ}$ і $1400-2000^{\circ}\text{C}$. Коли точка на рукоятці $Д\Phi$ (знак шкали відліку) збігається з блакитною точкою на корпусі пірометра, відлік температур тіла виробляють по нижній шкалі. Коли точка на рукоятці $Д\Phi$ (знак шкали відліку) збігається з червоною крапкою на корпусі пірометра, це

означає що димчастий фільтр введений і відлік яскравісних температур тіла роблять по верхній шкалі.

4 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ І ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Включити автотрансформатор в мережу напругою 220В.
2. Підготувати оптичний пірометр до проведення вимірювань, для чого перевірити положення стрілок приладів, які повинні бути на нулі.
3. Ввести опір реостата R , обережним поворотом проти годинникової стрілки кільця на корпусі пірометра так, щоб позначки 0 на поворотному кільці і шкалою пірометра збігалися.
4. Включіть джерело живлення пірометра.
5. Встановити вказівну точку на голівці $ДФ$ проти блакитної точки на корпусі пірометра. Відлік яркісних температур при цьому проводиться по нижній шкалі приладу, яка зазначена блакитною точкою.
6. Поступово повертаючи кільце реостата R за годинниковою стрілкою, довести розжарення пірометричної лампочки L до 1000°C .
7. Переміщуючи тубус окуляра, отримати чітке зображення нитки пірометричної лампи L в площині вимірюваного об'єкта (спіралі лампи N).
8. Через 10-15 хвилин після включення напруги лампи N (для досягнення термодинамічної рівноваги) уможливити відбір проб яркісної температури її нитки. Для цього, змінюючи яркість нитки пірометричної лампи L обертанням кільця реостата R , домогтися, щоб зник середній відрізок її нитки на фоні розжареної спіралі лампи N . Записати показання приладів амперметра, вольтметра, пірометра в таблицю 4.1.

9. Провести аналогічні вимірювання якісної температури лампи розжарювання для струмів зазначених на столі установки. При підвищенні температури вище 1300-1400°C (при силі струму 4А) повернути вказівну точку головки *ДФ* на 90°, щоб вона встановилася проти червоної точки на корпусі пірометра, і відлік якісних температур робити по верхній шкалі.

Таблиця 4.1.

Результати вимірювань і обчислень

I, A	U, B	$t_{\text{я}}, ^\circ C$	$t_o, ^\circ C$	T_o, K	λ_{max} мкм	P, Bm	$\ln P$	$\ln T$

Після закінчення вимірювань вимкнути коло живлення пірометра і вимірюваної лампи розжарювання. Провести обробку експериментальних даних в наступному порядку:

- За доданим графіком $t_o = f(t_{\text{я}})$ (див. Додаток) визначте дійсну температуру спіралі.
- Дійсну температуру спіралі досліджуваної лампи розжарювання переведіть в температуру абсолютної шкали температур за формулою: $T_o = t_o + 273$.
- Розрахуйте довжини хвиль, на які припадає максимум випромінювальної здатності нитки вольфраму при відповідних температурах за формулою (2.5). Визначте і охарактеризуйте діапазон випромінювання вольфрамової спіралі.
- Розрахуйте потужність, що підводиться до досліджуваної лампи розжарювання за формулою $P = IU$.

- е) Побудуйте графік залежності логарифма потужності живлення лампи від логарифма абсолютної температури спіралі. Визначте значення показника ступеня n в залежності (2.9) випромінювальної здатності вольфраму від його абсолютної температури, як тангенс кута нахилу отриманої прямої до вісі абсцис.
- ф) По пунктах 3 і 5 зробіть висновки.

5 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. У чому полягає ціль даної лабораторної роботи? Наведіть схему робочої установки, призначення приладів, методику проведення експерименту.
2. Який пристрій і принцип роботи оптичного пірометра?
3. Які величини характеризують теплове випромінювання тіл і як їх розраховують для абсолютно чорного тіла і для будь-якого тіла?
4. Дайте визначення моделі «абсолютно чорне тіло», «сіре тіло».
5. Наведіть і проаналізуйте графік залежності спектральної щільності випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла від довжини хвилі і температури. Сформулюйте і запишіть закони Стефана - Больцмана і Віна.
6. У чому полягає закон Кірхгофа? Дайте визначення величин, які входять до цього закону.
7. Як визначається в даній лабораторній роботі залежність потужності випромінювання вольфраму від його абсолютної температури?

6 РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Трофимова Т.И. Курс физики.– М.: Высшая школа, 1990. §§ 197-201.
2. Савельев И.В. Курс физики. – М.: Наука, 1987. Том 3 , §§1-7.
3. Фізика: навч. посіб. для студ. дистанц. форми навчання вищ.

техн. навч. закладів / І. Р. Зачек, Б. М. Романишин ; за
ред. :Ю.К.Рудавський; -Львів: Нац.Ун.«Львів. Політехніка».
- 2002. - 232 с.

ДОДАТОК

Графік залежності дійсної температури t_o від яркісної
температури t_y

