Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

О.О. Штофель

Визначення коефіцієнта теплопровідності

Лабораторний практикум

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Моделювання фізичних процесів»
спеціальності Е5 Фізика та астрономія

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2025

УДК 53.02 :533.1
Ш92

Автор: *Штофель Ольга Олександрівна,* канд. техн. наук.

Рецензент *Красікова І.Є.,* канд. фіз.-мат. наук., Інститут проблем матеріалознавства ім.І.М.Францевича Національної академії наук України

Відповідальний редактор *Савченко Д.В.,* д-р. фіз.-мат. наук, доцент

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 9 від 26.06.2025 р.)
за поданням вченої ради фізико-математичного факультету
(протокол № 7 від 04.06.2025 р.)

Штофель О.О.
Ш92 Визначення коефіцієнта теплопровідності [Електронний ресурс] : лаб. практикум: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Моделювання фізичних процесів» спец. Е5 Фізика та астрономія/ О.О. Штофель ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІім. Ігоря Сікорського, 2025. – 19 с.

Викладено теоретичні основи та методику визначення коефіцієнта теплопровідності повітря і металу нитки за результатами дослідження нагрівання вольфрамової нитки і повітря навколо неї у колбі. Методичний матеріал до лабораторної роботи призначені для здобувачів освіти ступеня бакалавр за спеціальністю Е5 Фізика та астрономія. Лабораторний практикум також може бути корисним для малих груп (до 10 осіб) при виконанні лабораторних робіт з курсу молекулярної фізики та термодинаміки для здобувачів освіти ступеня бакалавр за іншими технічними, інженерними спеціальностями.

УДК 53.02:533.1

Реєстр. № НП 24/25-599. Обсяг 0,62 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 р.

©О.О. Штофель, 2025
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025

Лабораторна робота. Визначення коефіцієнта теплопровідності повітря методом нагрітої нитки та металу нитки

Мета роботи: експериментальне визначення теплопровідності повітря, що знаходиться навкруги нагрітої електричним струмом нитки та теплопровідності вольфраму.

Обладнання: стійка з робочим елементом (тонкостінна мідна трубка, заповнена повітрям, уздовж осі якої натягнута вольфрамова нитка), блок управління, що вміщує датчик температури, напруги та сили струму.

Теоретичні відомості

Відрізняють три види теплового обміну або теплопередавання: теплове випромінювання, конвекція та теплопровідність.

Теплопровідність – це процес передачі тепла від більше нагрітого шару газу до менше нагрітого за рахунок хаотичного теплового руху молекул. При цьому здійснюється безпосередня передача енергії від молекул з більшою енергією до молекул з меншою енергією [1].

Для стаціонарного процесу, при якому різність температур в шарі газу не змінюється з часом, кількість теплоти δQ, яка переноситься внаслідок теплопровідності за час $d\tau$ через поверхню площею S, перпендикулярної до напрямку переносу енергії, в напрямку зменшення температури, визначається за законом Фур'є

$$\delta Q = -\lambda \frac{dT}{dx} S d\tau,$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності; $\frac{dT}{dx}$ - градієнт температури. Рівний швидкості зміни температури на одиницю довжини x в напрямку переносу енергії.

Для ідеального газу

$$\chi = \frac{1}{3} c_V \rho \langle v \rangle \langle l \rangle,$$

де c_V - питома теплоємність газу при сталому об’ємі; ρ - густина газу; $\langle v \rangle$ - середня арифметична швидкість теплового руху молекул:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}},$$

де $\langle l \rangle$ - середня довжина вільного пробігу молекул.

Теплопровідність (перенос енергії) разом з дифузією та внутрішнім тертям (перенос маси) або в'язкістю (перенос імпульсу молекул), відноситься до так званих явищ переносу. Всі три явища описуються схожими по структурі рівняннями.

Нехай є два коаксіальних циліндра з радіусами R_1 і R_2, простір між якими заповнений газом. Якщо внутрішній циліндр нагрівати, а температуру зовнішнього циліндрі підтримувати постійною, нижче температури нагрівача, то в кільцевому шарі газу виникає радіальний потік тепла, спрямований від внутрішнього циліндра к зовнішньому. При цьому температура шарів газу, що прилягають до циліндрів дорівнює температурі стінок циліндрів. Виділімо в газі кільцевий шар радіусом r, товщиною dr і довжиною (висотою циліндра) l. Згідно закону Фур'є тепловий потік $q = \frac{dQ}{d\tau}$ тобто кількість теплоти, яка проходить через даний шар площею за одну секунду, можна записати у вигляді

$$q = -\chi \frac{dT}{dr} S = -\chi \frac{dT}{dr} 2\pi r \cdot l.$$

Після розділу змінних

$$\frac{dr}{r} = -\frac{\chi 2\pi l}{q} \cdot dT$$

та інтегрування

$$\int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = \int_{T_1}^{T_2} -\frac{\chi 2\pi l}{q} \cdot dT$$

маємо

$$\ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{2\pi\lambda l}{q} (T_1 - T_2),$$

де T_1, R_1 і T_2, R_2- відповідні температури поверхонь та радіуси циліндрів.

Із останнього рівняння отримуємо формулу для визначення коефіцієнта теплопровідності газу:

$$\chi = \frac{q \ \ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi l \ (T_1 - T_2)}$$

Формулу коефіцієнта теплопровідності газу отримали із припущення, що теплота переноситься від внутрішнього до зовнішнього циліндру тільки завдяки теплопровідності. Це виходить з того, що потік енергії випромінювання при малих температурах та малому діаметрі нагрівача складає незначну частину теплоти, яка переноситься, а конвекція майже усувається підбором діаметру зовнішнього циліндра та його вертикальним розташуванням в експериментальній установці. Внутрішнім циліндром може бути тонка нитка (дріт), зазвичай вольфрамова, яка нагрівається електричним струмом. Після встановлення стаціонарного режиму тепловий потік можливо прийняти рівним потужності електричного струму, що йде через нитку.

$$q = I_н U_н,$$

$I_н$ - струм через нитку; $U_н$ - напруга на нитці. Якщо послідовно з ниткою з'єднати еталонний резистор з опором R_p, то

$$I_н = \frac{U_p}{R_p}$$

$$q = \frac{U_p U_н}{R_p}$$

І тоді

U_p- напруга на еталонному резисторі.

Отже,

$$\chi = \frac{U_p U_н \ \ln\frac{D}{d}}{2\pi l \ R_p \Delta T},$$

Де D і d - діаметри циліндрів, $\Delta T = T_н - T_m$ - різниця температур нитки та зовнішнього циліндра (трубки).

Температуру трубки T_m можливо прийняти рівній температурі зовнішнього повітря. Для обчислення різниці температур ΔT в шарі газу напишемо формули, по яких визначають опір нитки при температурі оточуючого повітря та в нагрітому стані.

$$R_{н0} = R_0\,(1 + at_0), \quad R_н = R_0(1 + at),$$

R_0 - опір нитки при $t = 0\ C°$; a - температурний коефіцієнт опору матеріалу нитки.

Виключивши із рівнянь R_0, знайдемо

$$\Delta T = t - t_0 = \frac{R_н - R_{н0}}{aR_{н0}}(1 + \alpha t_0).$$

Опір нитки вимірюємо методом порівняння напруг на нитці та еталонному резисторі. Враховуючи

$$R_н = \frac{U_н}{I_н}, \quad I_н = \frac{U_p}{R_p}, \quad R_{н0} = \frac{U_{н0}}{I_{н0}}, \quad I_{н0} = \frac{U_{p0}}{R_{p0}},$$

Отримуємо

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{U_н}{I_н} - \frac{U_{н0}}{I_{н0}}\right)}{a\frac{U_{н0}}{I_{н0}}}(1 + \alpha t_0).$$

$U_н$, $U_{н0}$ - напруги на нитці відповідно в нагрітому стані та при температурі оточуючого повітря t_0:

U_p, U_{p0} - напруга на еталонному резисторі відповідно при нагрітій нитці та при температурі оточуючого повітря.

Поняття про теплопровідність у твердих тілах. Рівняння Фур'є.

Теплопровідність - це перенесення теплоти структурними частинками речовини (молекулами, атомами, електронами) у процесі їхнього теплового руху. Такий теплообмін може відбуватися в будь-яких тілах із неоднорідним розподілом температур, але механізм перенесення теплоти залежатиме від агрегатного стану речовини [2].

Під час теплового контакту двох тіл, що мають різні температури T_1 і T_2 , відбувається передача теплоти від тіла з вищою температурою до тіла з нижчою температурою. Таке саме передавання теплоти відбувається між різними частинами одного й того самого тіла, якщо температури цих частин неоднакові. Розрізняють три механізми передавання теплоти: теплопровідність, конвекція та випромінювання.

Випромінювання розглядають в оптиці. У рідинах і газах передача теплоти можлива шляхом теплопровідності та конвекції. У твердому тілі конвекція не може виникнути, оскільки неможливе переміщення маси речовини разом із теплом. Тому перенесення тепла в твердому тілі здійснюється тільки теплопровідністю.

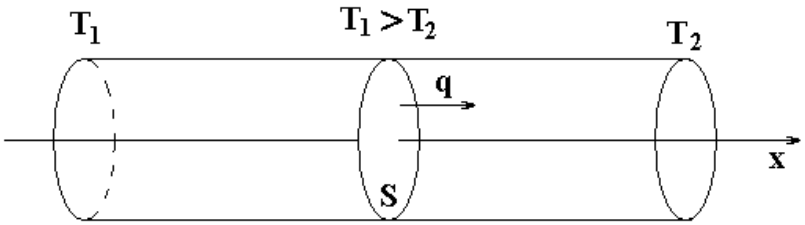

Рис. 1. Процес теплопровідності, одновимірний випадок.

Механізм перенесення тепла в твердому тілі описується так само, як і в газі. Якщо через одиницю площі перерізу S перпендикулярно до його площини в одиницю часу переноситься кількість теплаδ Q, то величина q називається густиною теплового потоку і визначається як

$$q = \frac{\delta Q}{S \cdot dt}$$

Щільність теплового потоку пов'язана з різницею температур, що спричиняє перенесення уздовж напрямку x (одновимірний випадок), співвідношенням

$$q = \chi \frac{T_1 - T_2}{dx} = -\chi \frac{dT}{dx},$$

де χ - коефіцієнт теплопровідності, $\frac{dT}{dx}$ - градієнт температури в напрямку x. Сенс градієнта температури полягає в тому, що він дорівнює зміні температури від однієї точки до іншої, віднесеній до відстані між ними. Градієнтом скалярної величини є вектор, спрямований у бік її найшвидшого зростання. Існування градієнта температури є необхідною умовою для виникнення теплопровідності.

Знак «-» у рівнянні означає, що потік тепла спрямований у бік протилежний за напрямком градієнту температури. Якщо зростанню x ($dx > 0$) відповідає пониження температури ($dT < 0$), то потік тепла спрямований у напрямку зростання x, щоб зменшити наявний градієнт температури, який його спричинив.

У тих випадках, коли речовина, в якій існує градієнт температури, надана сама собі, до неї ззовні не підводиться енергія, теплопровідність призводить до вирівнювання температури. Такий процес теплопровідності називають *нестаціонарним*. *Стаціонарна теплопровідність* спостерігається, якщо підтримується постійний градієнт температури.

Об'єднавши попередні два рівняння, отримаємо рівняння, яке описує процес теплопровідності і називається **рівнянням Фур'є**:

$$\delta Q = -\chi \frac{dT}{dx} S \cdot dt.$$

Коефіцієнт χ залежить від фізичної природи речовини та її стану. Коефіцієнт теплопровідності чисельно дорівнює кількості тепла [3], що переноситься за 1 секунду через одиницю площі, перпендикулярної напрямку поширення тепла, якщо градієнт температури дорівнює одиниці. Як випливає з рівняння Фур'є, коефіцієнт теплопровідності вимірюється в системі СІ в одиницях Дж/(м·с·К) або Вт/(м·К).

Значення коефіцієнта теплопровідності для деяких матеріалів наведено в додатку 1. Як видно з таблиці, метали мають великі коефіцієнти теплопровідності, вони є хорошими провідниками теплоти. Тверді речовини, які є діелектриками, як, наприклад, азбест, дерево, лід, і гази, є поганими провідниками теплоти, тому деякі з них застосовуються як теплові ізолятори. На поганій теплопровідності газів, наприклад, засноване застосування в будівництві пористих матеріалів.

Величина коефіцієнта теплопровідності χ не може бути обчислена так, як це робиться для ідеального газу - системи простішої, що складається з невзаємодіючих частинок. Наближено коефіцієнт теплопровідності можна обчислити за допомогою квантових уявлень.

Фонони та їхні властивості.

Атоми твердих тіл здійснюють теплові коливання біля положення рівноваги. Внаслідок їхньої сильної взаємодії між собою характер цих коливань виявляється вельми складним і точний його опис становить величезні труднощі [4]. Тому вдаються до наближених методів і спрощень. Замість того, щоб розглядати окремі коливання частинок. Розглядають їхній колективний рух у кристалі, як у просторово впорядкованій системі. Таке спрощення ґрунтується на тому, що внаслідок дії сил взаємодії коливання, що виникло в однієї частинки, негайно передається сусіднім частинкам і в кристалі збуджується колективний рух у формі пружної хвилі, що охоплює всі частинки кристала. Такий колективний рух називають *нормальним коливанням* решітки.

Кожне нормальне коливання несе із собою енергію та імпульс. Енергія нормального коливання решітки дорівнює енергії осцилятора, що має масу, яка дорівнює масі атомів, що коливаються, і який коливається з частотою, що дорівнює частоті нормального коливання. Нормальні осцилятори не мають нічого спільного з реальними атомами, крім однакової маси. Кожен осцилятор являє собою одне з нормальних коливань решітки. У коливальному русі беруть участь усі атоми кристала, здійснюючи його з однією і тією ж частотою ω.

Енергія квантового осцилятора визначається таким співвідношенням

$$E = \left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega \qquad (n = 0, 1, 2, 3 \ldots),$$

де ω - частота коливань осцилятора, n - квантове число, $\hbar$ - нормована постійна Планка, що дорівнює $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ($\hbar = 1.0545726 \cdot 10^{-34}$ *Дж* $\cdot$ *с*), h - постійна Планка ($h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ *Дж* $\cdot$ *с*) Енергетичний спектр лінійного гармонійного осцилятора складається з дискретних енергетичних рівнів, віддалених один від одного на відстані, що дорівнює $\hbar\omega$.

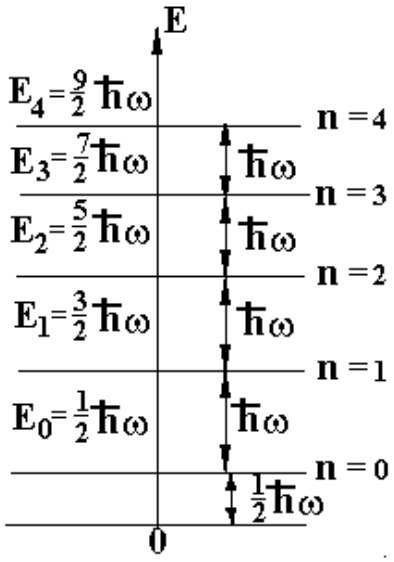

Рис.2. Енергетичний спектр лінійного гармонійного осцилятора.

Квантова теорія дає змогу зіставити коливанням, що поширюються в твердому тілі зі швидкістю звуку, деякі фіктивні частинки - фонони. Фонон – квазічастинка в кристалічному твердому тілі, яка є хвилею коливань атомів навколо їхніх рівноважних положень [5].

Мінімальна порція енергії, яку може поглинути або випустити решітка під час теплових коливань, відповідає переходу нормального коливання, що збуджується, з цього енергетичного рівня на сусідній рівень, що знаходиться поруч, і визначається як

$$\varepsilon = \hbar\omega = h\nu,$$

де ν - частота фонона. Цю порцію або квант енергії теплових коливань решітки називають енергією фонона. Поле пружних хвиль, що заповнюють кристал, можна трактувати як газ, утворений квантами нормальних коливань ґратки - фононами, що володіють енергією та імпульсом p:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{\hbar \cdot 2\pi}{\lambda} = \hbar k$$

де $v = c$ - швидкість фонона (швидкість хвилі), λ - довжина пружної звукової хвилі, k – хвильове число. Вектор імпульсу фонона збігається з напрямком поширення хвилі. *Енергію коливань атомів кристала можна представити як*

суму енергій окремих фононів, а кристал можна вважати резервуаром, наповненим своєрідним газом не взаємодіючих частинок - фононів.

Основна відмінність фононів від справжніх частинок у тому, що вони можуть існувати тільки всередині кристала. Фонони не можуть існувати у вакуумі, як, наприклад, електрони, фотони. Але там, де вони існують, вони поводяться як справжні частинки, підкоряючись законам збереження, проявляючи властивості специфічних квантових частинок, переносячи в просторі імпульс і енергію.

Теплопровідність діелектриків.

Теплопровідність твердих тіл має різну природу залежно від типу твердого тіла. У діелектриках, що не мають вільних електричних зарядів, перенесення енергії теплового руху здійснюється фононами. Теплопровідність діелектриків називають іноді ґратчастою теплопровідністю, маючи на увазі, що вона зумовлена фононами.

Розглянемо механізм теплопровідності діелектриків. Вважаючи, що кристал містить фононний газ, можна розглядати явище теплопровідності як явище перенесення енергії окремими фононами.

Якби атоми здійснювали строго гармонійні коливання, що поширюються в решітці у вигляді системи пружних хвиль, які не взаємодіють між собою, то ці хвилі поширювалися б у кристалі, не розсіюючись, тобто не зустрічаючи жодного опору, подібно до поширення світла у вакуумі. Якщо в такому кристалі створити різницю температур, то атоми з області, де температура більша, що коливаються з великими амплітудами, передавали б свою енергію сусіднім атомам, і фронт хвилі поширювався б у кристалі зі швидкістю звуку. За відсутності опору навіть за нескінченно малої різниці температур тепловий потік міг би досягати як завгодно великої величини. Теплопровідність такого кристала була б нескінченно великою.

У реальних кристалах коливання атомів мають негармонійний характер, що призводить до того, що нормальні коливання решітки втрачають незалежний характер і взаємодіють одне з одним, обмінюючись енергією і змінюючи напрямок поширення (розсіюючись). Опис процесу розсіювання нормальних коливань зручно вести мовою фононів. У разі якщо нормальні коливання решітки є незалежними, фонони утворюють ідеальний газ - газ невзаємодіючих фононів. Перехід до негармонійних коливань еквівалентний введенню взаємодії між фононами.

У кінетичній теорії газів виводиться, що коефіцієнт теплопровідності газів дорівнює

$$\lambda = \frac{1}{3} c_V \rho \langle v \rangle \langle l \rangle,$$

де c_V - питома теплоємність газу при сталому об'ємі; ρ - густина газу; $\langle v \rangle$ - середня арифметична швидкість теплового руху молекул, $\langle l \rangle$ - середня довжина вільного пробігу молекул.

Застосуємо цю формулу до фононного газу, підставивши в неї c_V - теплоємність фононного газу, $\langle l \rangle = \tilde{\lambda}_ф$ - середню довжину вільного пробігу фононів, замість $\langle v \rangle$ буде $\tilde{v}_ф$ - середня швидкість фононів, ρ - густина тіла. Швидкість фононів $\tilde{v}_ф$ - це швидкість звуку, тобто швидкість поширення пружних хвиль у кристалі. Враховуючи ці заміни, отримаємо для коефіцієнта теплопровідності гратки $\chi_{ГР}$

$$\chi_{ГР} = \frac{1}{3} c_V \rho \tilde{v}_ф \tilde{\lambda}_ф.$$

Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності решітки визначається залежністю від температури довжини вільного пробігу і теплоємності.

Якщо експериментально отримати значення $\chi_{ГР}$, c_V і $\tilde{v}_ф$ для кристалів, то можна знайти довжину вільного пробігу фононів.

Наприклад, $\tilde{\lambda}_ф$ для кварцу та кухонної солі
за температури <u>273 К</u> становить відповідно:
$\tilde{\lambda}_ф(SiO_2) = 4 \cdot 10^{-9}$*м і* $\tilde{\lambda}_ф(NaCl) = 2.3 \cdot 10^{-9}$*м,*
а за температури <u>83 К</u> середня довжина вільного пробігу дорівнює відповідно
$\tilde{\lambda}_ф(SiO_2) = 5.46 \cdot 10^{-8}$*м і* $\tilde{\lambda}_ф(NaCl) = 10^{-9}$*м.*

Експериментальні дані свідчать про те, що теплопровідність кристалів на два-три порядки перевищує теплопровідність газів (табл. 1). Крім того, теплопровідність металевих кристалів перевищує теплопровідність діелектричних (табл. 1).

Наприклад, коефіцієнт теплопровідності алюмінію дорівнює 240 Вт/(м·К), у кварца він не перевищує 5 Вт/(м·К), а для більшості газів за атмосферного тиску і кімнатної температури приблизно дорівнює $30 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м · К).

Теплопровідність металів.

У металах на відміну від діелектриків перенесення теплоти здійснюється не тільки фононами, а й вільними електронами. Тому теплопровідність металів χ у загальному випадку складається з теплопровідності решітки $\chi_{ГР}$ (зумовленої фононами) і теплопровідності χ_e, зумовленої вільними електронами

$$\chi = \chi_{ГР} + \chi_e.$$

Теплопровідність електронного газу можна визначити на підставі (7), підставивши в цю формулу $\tilde{\lambda}_e$ - середню довжину вільного пробігу електронів, $\tilde{v}_e$ - середню швидкість електронів, c_e - теплоємність електронного газу.

$$\chi_{ГР} = \frac{1}{3} c_e \rho \tilde{v}_e \tilde{\lambda}_e.$$

Оцінимо відносну частку, що припадає на теплопровідність гратки металу. Отримаємо:

$$\frac{\chi_{ГР}}{\chi_e} = \frac{c_V \tilde{v}_ф \tilde{\lambda}_ф}{c_e \tilde{v}_e \tilde{\lambda}_e}.$$

Для чистих металів $\frac{c_e}{c_V} \approx 0.01$, $\tilde{v}_e \approx 10^6$ *м/с*, $\tilde{v}_ф \approx 5 \cdot 10^3$ *м/с*, $\tilde{\lambda}_e \approx 10^{-8}$ *м*, $\tilde{\lambda}_ф \approx 10^{-9}$ *м*, тому маємо:

$$\frac{\chi_{ГР}}{\chi_e} \approx 5 \cdot 10^{-2}.$$

Отже, теплопровідність чистих металів майже повністю визначається теплопровідністю їхнього електронного газу, на частку провідності гратки припадає лише кілька відсотків. Цим пояснюється висока теплопровідність металів порівняно з неметалами, у яких фонони - єдині переносники тепла.

Наявність у металах електронного газу дає змогу очікувати, що між електропровідністю твердих тіл та їхньою електронною теплопровідністю має існувати зв'язок. У 1853 році німецькими фізиками Г. Відеманом і Р. Францем було експериментально встановлено, що відношення коефіцієнта теплопровідності χ до питомої електропровідності σ для металів за однакової температури постійне:

$$\frac{\chi}{\sigma} = const.$$

У 1881 році данський фізик Л. Лоренц експериментально показав, що це відношення пропорційне температурі T:

$$\frac{\chi}{\sigma} = L \cdot T$$

де L - число Лоренца, однакове практично для всіх металів за кімнатної та більш високих температур. На базі квантової статистики для числа Лоренца було отримано співвідношення

$$L = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k^2}{e^2},$$

де $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$ - постійна Больцмана; $e = 1.602 \cdot 10^{-19}\ Кл$ - заряд електрона. Враховуючи, що в більшості металів $\chi_{ГР} \ll \chi_e$, у виразі формулі Лоренца можна замінити χ на χ_e, та підставити значення числа Лоренці на базі квантової статистики:

$$\frac{\chi_e}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k^2}{e^2} \cdot T$$

Отриманий вираз має назву **закону Відемана-Франца**.

Опис експериментальної установки

Установка призначена для експлуатації в закритих приміщеннях при температурі навколишнього повітря від +10ºС до +35ºС і відносній вологості не більше 80%.

Технічні характеристики установки:

Матеріал нитки	вольфрам
Опір вольфрамової нитки R_{20} при 20ºС, Ом	24±1
Діаметр вольфрамової нитки d_1, мм	0.1
Діаметр мідної трубки, мм	
- внутрішній d_2	12
- зовнішній D	15
Довжина вольфрамової нитки l, мм	400
Опір еталонного резистора R_p, Ом	0.01
Діапазон регулювання струму через нитку, мА, не менше	0-250
Похибка визначення часу секундоміром, %, не більше	5
Живлення установки:	мережа 220 В±10% 50 Гц
Споживана потужність, Вт, не більше	30

Установка має настільну конструкцію, яка включає: стійку з робочим елементом 1 і блок управління з джерелами живлення 2.

Зовнішній вигляд установки.

Робочий елемент (об'єкт дослідження) установки являє собою тонкостінну мідну трубку, заповнену повітрям, уздовж осі якої натягнута вольфрамова нитка. Температура трубки в ході експерименту вимірюється датчиком температури і реєструється цифровим термометром. Для вимірювання температури вольфрамової нитки непрямим методом використовуються показання цифрового табло. Для прискореного охолодження установки після закінчення лабораторної роботи є вентилятор.

Блок управління містить джерела живлення для вимірювальних приладів і регульований стабілізатор струму, що протікає через вольфрамову нитку. На передній панелі блоку розташовані такі органи управління кнопки включення і виключення нагріву нитки кнопки регулювання струму потужність нагріву кнопки управління роботою вентилятора охолодження і паузою для зчитування показань індикаторів. На задній панелі блоку розташовані кнопка включення живлення запобіжники і клема заземлення установки. Для з'єднання блоку зі стійкою служить кабель із роз'ємами на кінцях.

Порядок виконання роботи

1. Підготувати таблицю до запису експериментальних даних:

№ п/п	I_n, мА	t_2, °C	T_2, K	T_1, K
1	50±10			
2	100±15			
3	150±15			
4	200±15			
5	250±15			
6	300±15			

t_0°C =	

2. Включити живлення установки вимикачем мережі розташованим на задній панелі блоку. Повинні загорітися індикатори розташовані на передній панелі блоку управління. Показання індикатора температури будуть відповідати температурі навколишнього середовища. На інших індикаторах повинні бути нулі.
3. Включити нагрів нитки натисканням кнопки «Нагрівання 1» і виставити кнопкою «Ватт-більше» по індикатору струму, стум в межах 50±10 мА, з кожним новим дослідом збільшуючи на 50 мА. Дати прогрітися нитці і трубці впродовж 180±10 с (слідкуйте за секундоміром на установці).
4. Запишіть в таблицю п.п.1 значення струму і температури на поверхні мідної трубки.
5. Вимкнути нагрів натисненням кнопки «Нагрівання 0».
6. Повторити експеримент за п.п. 3-5 для кожного струму наведеного в таблиці п.п 1.

Обробка експериментальних даних

1. Підготуйте розрахункову таблицю:

№ п/п	I_n, мА	R_t, Ом	T_1, К	$Q_i, Вт$	$\frac{dQ_i}{dT_{1i}}, \frac{Вт}{К}$	χ_n, Вт/(м·К)	χ_n^m, Вт/(м·К)
1	50±10						
2	100±15						
3	150±15						
4	200±15						
5	250±15						
6	300±15						

$\alpha_R =$	$4.5 \cdot 10^{-3}\ \frac{1}{K}$	$U_0 =$	12.5 В
		$R_{20} =$	24±1 Ом

2. Розрахувати опір вольфрамової нитки R_t для кожного значення струму нагріву I_n за формулою

$$R_t = \frac{U_0}{I_n}$$

3. Розрахувати температуру нитки для кожного значення струму нагріву T_1 по формулі

$$T_1 = \left(\frac{R_t - R_{20}}{\alpha_R R_{20}}\right) + T_2,$$

де α_R - температурний коефіцієнт опору вольфраму.

4. Для кожної сили струму розрахувати потужність за формулою

$$Q = U_0 \cdot I_n.$$

5. Побудувати графік залежності $Q = f(T_1)$ та визначити тангенс кута нахилу, який дорівнює $tg(\alpha) = \frac{dQ_i}{dT_{1i}}$.

6. Розрахувати коефіцієнт теплопровідності повітря по формулі:

$$\chi_n = \frac{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2\pi l} \cdot \frac{dQ_i}{dT_{1i}}$$

7. Перевірити кореляцію даних за формулою

$$\chi_n^m = \frac{U_p U_0 \ \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2\pi l \ R_p \Delta T}$$

U_0 - напруга на нитці, $U_p = I_n R_p$- напруга на еталонному резисторі, R_p - опір еталонного резистора, d_2 і d_1 - діаметри циліндрів, $\Delta T = T_н - T_m$ - різниця температур нитки та зовнішнього циліндра (трубки).

8. Розрахуйте питому провідність σ матеріалу нитки, використовуючи дані її діаметра d_1, опору R_{20} та довжини:

$$\sigma = \frac{1}{\rho};$$

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$$\Rightarrow \quad \sigma = \frac{l}{RS}$$

9. Розрахувати коефіцієнт теплопровідності вольфрамової нитки та мідного циліндра за законом ***Відемана-Франца***:

$$\chi_{тіла} = \sigma \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k^2}{e^2} \cdot T,$$

де T - кімнатна температура, $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$ - постійна Больцмана; $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ *Кл* - заряд електрона.

Тверде тіло	$\chi_{експ}$	$\chi_{теор}$	δ_χ
Вольфрам			
Мідь			

10. Проаналізуйте отримані дані порівнявши з теоретичними даними.

11. Обрахуйте відносні похибки вимірювань:

$$\boldsymbol{\delta_\chi = \frac{\Delta\chi}{\chi^{теор}} \cdot 100\% = \frac{\chi^{експ} - \chi^{теор}}{\chi^{теор}} \cdot 100\%}$$

$\boldsymbol{\delta_\chi(повітря)} =$ _____

$\boldsymbol{\delta_\chi(вольфраму)} =$ _____

$\boldsymbol{\delta_\chi(міді)} =$ _____

Контрольні запитання

1. У чому полягає явище теплопровідності? Які рівняння описують явище теплопровідності?
2. Що таке коефіцієнт теплопровідності? У чому полягає фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності?
3. Від чого залежить коефіцієнт теплопровідності газів?
4. Які частинки називають фононами?
5. Яка природа теплопровідності діелектриків? металів?
6. Поясніть, чому метали мають більші значення коефіцієнта теплопровідності, ніж діелектрики?
7. Сформулюйте закон Відемана-Франца і поясніть його сутність.

Література

1. Лопатинський І.Є., Зачек І.Р., Ільчук Г.А., Романишин Б.М. Фізика. Підручник. –Львів: Афіша, 2005-394 с.
2. Воловик П.М. Фізика: Для ун-тів.-К.; Ірпінь: Перун, 2005. -864 с.: іл..
3. Волков О.Ф., Лумпієва Т.П. Курс фізики: У 2-х т. Т.1: Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. Електростатика. Постійний струм. Електромагнетизм: Навчальний посібник для студентів інженернотехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів. − Донецьк: ДонНТУ, 2009. – 224 с.
4. Курс загальної фізики : навчальний посібник / В.М. Вакалюк, А.В. Вакалюк ; Міністерство освіти і науки України, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2021

Використані джерела:

1. Електронний ресурс: https://kzf.kpi.ua/wp-content/uploads/2021/09/Lab_rob_T3-319-1.pdf
2. Поплавко Ю. М. П57 Фізика діелектриків : підручник / Ю. М. Поплавко ; за заг. ред. акад. НАН України Ю. І. Якименка. – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – 572 с. – Бібліогр. : с. 565–568. – 50 пр.
3. Артеменко Ю.А. Фізика. Частина 1: навч. посіб. / Ю.А. Артеменко, О.М. Любименко. – Луцьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2022. – 259 с.: іл.46, табл.7. – Бібліогр. 9.
4. Подопригора Н.В. Фізика твердого тіла : навчальний посібник для студентів фізичних спеціальностей педагогічних університетів / Подопригора Н.В., Садовий М.І., Трифонова О.М. – Кіровоград : РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2013. – с.
5. Електронний ресурс: https://www.wikiwand.com/uk/articles/%D0%A4%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%BD

Додаток 1.

	Речовина	Т, К	χ, *Вт/*(м·К)
Гази	**Водень**	300	0,183
	Гелій	300	0,152
	Кисень	300	0,0267
	Аргон	300	0,0177
	Азот	300	0,0257
	Повітря	300	0,0262
Метали	**Срібло**	400	425
	Вольфрам	300	163
	Мідь	400	393
	Залізо	400	70
	Олово	400	62
	Алюміній	400	240
	Свинець	400	34
Діелектрики	**Хлорид натрію**	273	6,9
	Турмалін	273	4,6
	Скло	293	0,4÷1,0
	Дерево	293	0,095÷0,20
	Азбест	293	0,4÷0,8
	Кварц	291	5,0
	Цегла	298	0,27÷0,81
	Лід	273	2,2